

**COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO CONVENCIONAL Y LAS ECUACIONES
EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE
PARTÍCULAS FLOCULENTAS CON LOS RESULTADOS DE UN
SEDIMENTADOR LAMELAR**

**JEIMY MARIELA MANCHOLA ACOSTA
LORENA OLARTE BENAVIDES**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2019**

**COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO CONVENCIONAL Y LAS ECUACIONES
EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE
PARTÍCULAS FLOCULENTAS CON LOS RESULTADOS DE UN
SEDIMENTADOR LAMELAR**

**JEIMY MARIELA MANCHOLA ACOSTA
LORENA OLARTE BENAVIDES**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
FELIPE SANTAMARIA ÁLZATE**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ D.C.
2019**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

Con este proyecto se culmina una etapa de mi vida que he esperado mucho, el ser profesional es algo que me llena de muchísima alegría, el poder ayudar en la construcción de un mejor país es una gran satisfacción. Le agradezco a mis viejitos por su apoyo incondicional, esta es la mejor herencia que me han podido dar; a mis hermanas que son mi ejemplo.

Lorena Olarte Benavides

A mi familia Padre, Madre, Hijo, Hermana y Esposo, que con su amor, ayuda, motivación consejos, apoyo incondicional han hecho de mi una persona íntegra y capaz de sacar este proyecto adelante para beneficio mío y de la sociedad en general.

Jeimy Mariela Manchola Acosta

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Ing. Felipe Santamaría Álzate, Director del Trabajo de Grado, por su constante interés y motivación en el mismo.

Sr. Javier Mendoza, por su colaboración y disposición durante las prácticas de laboratorio para el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

Para la realización de las prácticas de laboratorio en la planta de tratamiento de agua potable de la Universidad Católica de Colombia, fue necesario puntualizar los caudales a emplear en esta, con el fin de obtener los datos requeridos para el análisis de este trabajo; se utilizaron, el caudal de diseño de esta planta, así como también, se utilizó la mitad del caudal de diseño de esta.

Se retomaron algunos de los datos obtenidos de la turbiedad que presenta una torre de sedimentación logrados en el trabajo de grado: *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de SAM para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”*¹, con el fin de realizar la comparación por el método gráfico a través de las curvas de isoconcentración y los resultados obtenidos de remoción de turbiedad que presenta un sedimentador lamelar, para determinar por medio de cálculos, la eficiencia de remoción que se presenta en cada uno de los métodos empleados, (Torre de sedimentación y sedimentador de alta tasa).

Por otra parte, se realizó la comparación de ecuaciones empíricas de los autores: Evans M.N. Chirwa, Adem Özer, Hasan Ali San y P. Piro que predicen la remoción de partículas con los resultados obtenidos de las turbiedades, las cuales se realizaron en el laboratorio de la Universidad Católica de Colombia.

Con las eficiencias de remoción encontradas a partir de los laboratorios de turbiedad desarrollados en la planta de tratamiento de agua potable, se realizaron cálculos de eficiencias de remoción, velocidades ascensionales, velocidades de sedimentación crítica, tiempo de remoción, entre otros con el fin de determinar la eficiencia que presenta un sedimentar lamelar, ya que no es posible un análisis matemático debido al contacto aleatorio entre las partículas.

¹ SÁNCHEZ, Andrés y SOTELO, Diego. Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de SAM para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería. Modalidad Investigación, 2018.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. GENERALIDADES	21
1.1. ANTECEDENTES	21
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA	22
1.3. OBJETIVOS	23
1.3.1. Objetivo General	23
1.3.2. Objetivos Específicos	23
1.4. JUSTIFICACIÓN	23
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	24
1.5.1. Limitaciones	24
1.6. MARCO DE REFERENCIA	25
1.6.1. Marco Teórico	25
1.6.1.3. Sedimentación	28
1.6.1.4. Sedimentación de Flujo Laminar o Alta Rata (Tasa)	31
1.6.1.5. Mezcla Rápida – Coagulación	33
1.7. ESTADO DEL ARTE (Ecuaciones Empíricas)	34
1.7.1. Enfoque Analítico para la Evaluación de la Configuración de los Datos de Columna (Hasan Ali San)	35
1.7.2. Simulación Computacional de la Sedimentación Floculante Basada en Resultados Experimentales (Evans M.N. Chirwa y Otros)	37
1.7.3. Caracterización del Proceso de Asentamiento de Aguas Residuales de un Sistema de Alcantarillado Combinado. (P. Piro y Otros).	41
1.7.4. Ecuaciones Simples para Expresar la Configuración de Datos de Columna. (Adem Ozer)	45
1.8. METODOLOGÍA	48
1.8.1. Fase 1: Torre de Sedimentación	48
1.8.3. Fase 2: Sedimentador lamelar	48
1.8.2. Fase 3: Comparación de los resultados obtenidos.	49
1.8.4. Fase 4: Recomendaciones	49

2.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	50
2.1.	ELECCIÓN DE TURBIEDADES Y CAUDALES.....	50
2.2.	PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA.	50
2.2.1.	Alcalinidad.....	51
2.3.	SOLUCIÓN COAGULANTE.....	53
2.4.	FUNCIONAMIENTO PTAP.....	53
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
3.1.	TOMA DE MUESTRAS EN LA PTAP PILOTO	56
3.1.1.	Turbiedad: 9.1 NTU – Caudal 0.1 lt/s.	56
3.1.2.	Turbiedad: 11.3 NTU – Caudal 0.1 lt/s.	57
3.1.3.	Turbiedad: 14.5 NTU – Caudal 0.1 lt/s.	58
3.1.4.	Turbiedad: 9.1 NTU – Caudal 0.05 lt/s.	60
3.1.5.	Turbiedad: 11.6 NTU – Caudal 0.05 lt/s.	62
3.1.6.	Turbiedad: 15 NTU – Caudal 0.05 lt/s.	63
3.2.	CÁLCULOS PARA EL CAUDAL 1 (Q1).....	65
3.2.1.	Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 9.1 NTU	65
3.2.1.1.	Cálculos Iniciales de la PTAP	65
3.2.1.2.	Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar. 65	
3.2.1.3.	Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa.....	66
3.2.1.4.	Cálculo de eficiencia de Adem Özer	67
3.2.1.5.	Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San.....	68
3.2.1.6.	Cálculo de eficiencia de P. Piro	69
3.2.1.7.	Calculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación	70
3.2.2.	Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 11.3 NTU	72
3.2.2.1.	Cálculos Iniciales de la PTAP	72
3.2.2.2.	Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar. 73	
3.2.2.3.	Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa.....	73
3.2.2.4.	Cálculo de eficiencia de Adem Özer	74
3.2.2.5.	Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San.....	75

3.2.2.6.	Cálculo de eficiencia de P. Piro	76
3.2.2.7.	Calculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación	77
3.2.3.	Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 14.5 NTU	79
3.2.3.1.	Cálculos Iniciales de la PTAP	79
3.2.3.2.	Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar. 79	
3.2.3.3.	Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa.....	80
3.2.3.4.	Cálculo de eficiencia de Adem Özer	81
3.2.3.5.	Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San.....	82
3.2.3.6.	Cálculo de eficiencia de P. Piro	82
3.2.3.7.	Calculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación	83
3.3.	CÁLCULOS PARA EL CAUDAL 2 ($Q_2 = 0.05$ l/s)	85
3.3.1.	Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 9.21 NTU.	85
3.3.1.1.	Cálculos Iniciales de la PTAP	85
3.3.1.2.	Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar. 85	
3.3.1.3.	Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa.....	86
3.3.1.4.	Cálculo de eficiencia de Adem Özer	87
3.3.1.5.	Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San.....	88
3.3.1.6.	Cálculo de eficiencia de P. Piro	88
3.3.1.7.	Calculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación	89
3.3.2.	Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 11.6 NTU.	91
3.3.2.1.	Cálculos Iniciales de la PTAP.	91
3.3.2.2.	Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar. 91	
3.3.2.3.	Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa.....	92
3.3.2.4.	Cálculo de eficiencia de Adem Özer	93
3.3.2.5.	Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San.....	94
3.3.2.6.	Cálculo de eficiencia de P. Piro	94
3.3.2.7.	Calculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación	95

3.3.3.	Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 15 NTU	97
3.3.3.1.	Cálculos Iniciales de la PTAP	97
3.3.3.2.	Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar. 97	
3.3.3.3.	Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa.....	98
3.3.3.4.	Cálculo de eficiencia de Adem Özer	99
3.3.3.5.	Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San.....	100
3.3.3.6.	Cálculo de eficiencia de P. Piro	100
3.3.3.7.	Calculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación	101
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	103
4.1.	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS: TURDIEDAD 9.1 NTU – CAUDAL 1.	103
4.2.	ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURDIEDAD 11.3 NTU – CAUDAL 1.	108
4.3.	ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURDIEDAD 14.5 NTU – CAUDAL 1.	113
4.3.2.	Análisis y comparación según Evans M.N. Chirwa	114
4.4.	ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURDIEDAD 9.21 NTU – CAUDAL 2.	118
4.5.	ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURDIEDAD 11.6 NTU – CAUDAL 2.	123
4.5.3.	Análisis y comparación según Adem Özer	124
4.6.	ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURDIEDAD 15 NTU – CAUDAL 2.	128
5.	CONCLUSIONES.....	133
6.	RECOMENDACIONES	135
7.	BIBLOGRAFÍA	136
	ANEXOS	138

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DIFERENTES MODELOS DEL PROCESO DE CLARIFICACIÓN POR SEDIMENTACIÓN.	29
TABLA 2. DIMENSIONES DE LA PLANTA PILOTO.	55
TABLA 3. PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA PARA EL CAUDAL 1 Y LA TURBIEDAD DE 9.1.	56
TABLA 4. DATOS DE TURBIEDAD (NTU) TOMADOS EN EL INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO PARA EL CAUDAL 1 Y NTU 9.1.	56
TABLA 5. PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA PARA EL CAUDAL 1 Y LA TURBIEDAD DE 11.3.	57
TABLA 6. DATOS DE TURBIEDAD (NTU) TOMADOS EN EL INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO PARA EL CAUDAL 1 Y NTU 11.3.	58
TABLA 7. PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA PARA EL CAUDAL 1 Y LA TURBIEDAD DE 14.5.	59
TABLA 8. DATOS DE TURBIEDAD (NTU) TOMADOS EN EL INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO PARA EL CAUDAL 1 Y NTU 14.5.	59
TABLA 9. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.5.	60
TABLA 10. PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA PARA EL CAUDAL 2 Y LA TURBIEDAD DE 9.21.	60
TABLA 11. DATOS DE TURBIEDAD (NTU) TOMADOS EN EL INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO PARA EL CAUDAL 2 Y NTU 9.21.	61
TABLA 12. PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA PARA EL CAUDAL 2 Y LA TURBIEDAD DE 11.6.	62
TABLA 13. DATOS DE TURBIEDAD (NTU) TOMADOS EN EL INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO PARA EL CAUDAL 2 Y NTU 11.6.	62
TABLA 14. PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA PARA EL CAUDAL 2 Y LA TURBIEDAD DE 15.	63
TABLA 15. DATOS DE TURBIEDAD (NTU) TOMADOS EN EL INTERVALO DE TIEMPO DEFINIDO PARA EL CAUDAL 2 Y NTU 15.	64
TABLA 16. CÁLCULOS INICIALES DE LA PTAP.	65
TABLA 17. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 9.1.	66
TABLA 18. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 9.1.	66
TABLA 19. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 9.1.	67
TABLA 20. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 9.1.	67
TABLA 21. PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN Q_1 , NTU 9.1.	68
TABLA 22. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 9.1.	69
TABLA 23. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 9.1.	69

TABLA 24. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 9.1.	72
TABLA 25 CÁLCULOS INICIALES DE LA PTAP.....	72
TABLA 26. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 11.3.	73
TABLA 27. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 11.3.....	73
TABLA 28. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 11.3.....	74
TABLA 29. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 11.3.	74
TABLA 30. PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN Q_1 , NTU 11.3.	75
TABLA 31. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 11.3.....	75
TABLA 32. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 11.3.	76
TABLA 33. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 11.3.	78
TABLA 34 CÁLCULOS INICIALES DE LA PTAP.....	79
TABLA 35. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.5.....	80
TABLA 36. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.5.....	80
TABLA 37. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.5.....	80
TABLA 38. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.5.	81
TABLA 39. PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN Q_1 , NTU 14.5.	81
TABLA 40. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.5.....	82
TABLA 41. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.5.	82
TABLA 42. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_1 , NTU 14.9.	84
TABLA 43. CÁLCULOS INICIALES DE LA PTAP.....	85
TABLA 44. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 9.21.....	86
TABLA 45. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 9.21.....	86
TABLA 46. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 9.21.....	87
TABLA 47. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 9.21.	87
TABLA 48. PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN Q_2 , NTU 9.1.	87
TABLA 49. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 9.21.....	88
TABLA 50. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 9.21.	89
TABLA 51. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 9.1.	90
TABLA 52 CÁLCULOS INICIALES DE LA PTAP.....	91
TABLA 53. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 11.6.....	92
TABLA 54. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 11.6.....	92
TABLA 55. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 11.6.....	93
TABLA 56. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 11.6.	93
TABLA 57. PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN Q_2 , NTU 11.6.	93
TABLA 58. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 11.6.....	94
TABLA 59. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 11.6.	95
TABLA 60. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 11.8.	96
TABLA 61 CÁLCULOS INICIALES DE LA PTAP.....	97
TABLA 62. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 15.....	98

TABLA 63. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 15,.....	98
TABLA 64. EFICIENCIAS DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 15.....	99
TABLA 65. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 15.....	99
TABLA 66. PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN Q_2 , NTU 15.	99
TABLA 67. PORCENTAJE DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 15.....	100
TABLA 68. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 15.	101
TABLA 69. CÁLCULOS PARA DETERMINAR EFICIENCIA DE REMOCIÓN Q_2 , NTU 14.9.	102
TABLA 70. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_1 , NTU 9.1.....	104
TABLA 71. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_1 , NTU 9.1.....	104
TABLA 72. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_1 , NTU 9.1.	105
TABLA 73. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_1 , NTU 9.1.	105
TABLA 74. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE HASAN ALI SAN Q_1 , NTU 9.1.	106
TABLA 75. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE P. PIRO Q_1 , NTU 9.1.	107
TABLA 76. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON TORRE DE SEDIMENTACIÓN Q_1 , NTU 9.1.	107
TABLA 77. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_1 , NTU 11.3.....	109
TABLA 78. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_1 , NTU 11.3.....	109
TABLA 79. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_1 , NTU 11.3.	110
TABLA 80. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_1 , NTU 11.3.	110
TABLA 81. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE HASAN ALÍ SAN Q_1 , NTU 11.3.	111
TABLA 82. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE P. PIRO Q_1 , NTU 11.3.	112
TABLA 83. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON TORRE DE SEDIMENTACIÓN Q_1 , NTU 11.3.	112
TABLA 84. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_1 , NTU 14.5.....	114
TABLA 85. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_1 , NTU 14.5.....	114

TABLA 86. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_1 , NTU 14.5	115
TABLA 87. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_1 , NTU 14.5	115
TABLA 88. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE HASAN ALÍ SAN Q_1 , NTU 14.5.	116
TABLA 89. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE P. PIRO Q_1 , NTU 14.5.	117
TABLA 90. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON TORRE DE SEDIMENTACIÓN Q_1 , NTU 14.5.	117
TABLA 91. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_2 , NTU 9.21.....	119
TABLA 92. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_2 , NTU 9.21.....	119
TABLA 93. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_2 , NTU 9.21.	120
TABLA 94. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_2 , NTU 9.21.	120
TABLA 95. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE HASAN ALI SAN Q_2 , NTU 9.21.	121
TABLA 96. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE P. PIRO Y OTROS Q_2 , NTU 9.21.	122
TABLA 97. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON LA TORRE DE SEDIMENTACIÓN Q_2 , NTU 9.21.....	122
TABLA 98. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_2 , NTU 9.21.....	123
TABLA 99. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_2 , NTU 9.21.....	124
TABLA 100. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_2 , NTU 11.6.	124
TABLA 101. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE HASAN ALI SAN Q_2 , NTU 11.6.	125
TABLA 102. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE HASAN ALI SAN Q_2 , NTU 11.6.	126
TABLA 103. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE P. PIRO Y OTROS Q_2 , NTU 11.6.	127
TABLA 104. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON LA TORRE DE SEDIMENTACIÓN Q_2 , NTU 11.8.....	127

TABLA 105. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_2 , NTU 15.....	128
TABLA 106. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE EVANS M.N. CHIRWA Q_2 , NTU 15.....	129
TABLA 107. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_2 , NTU 15.....	129
TABLA 108. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE ADEM ÖZER Q_2 , NTU 15.....	130
TABLA 109. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE HASAN ALÍ SAN Q_2 , NTU 15.....	130
TABLA 110. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON ECUACIONES EMPÍRICAS DE P. PIRO Q_2 , NTU 15.	131
TABLA 111. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS DEL SEDIMENTADOR LAMELAR CON TORRE DE SEDIMENTACIÓN Q_2 , NTU 15.	132

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1 ÁREA BAJO LA CURVA FUENTE: AUTORES.....	70
GRÁFICA 2. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN DE 9.1 NTU.....	71
GRÁFICA 3 ÁREA SOBRE LA CURVA	76
GRÁFICA 4. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN DE 11.8 NTU.....	78
GRÁFICA 5 ÁREA SOBRE LA CURVA	83
GRÁFICA 6. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN DE 14.9 NTU.....	84
GRÁFICA 7 ÁREA SOBRE LA CURVA	89
GRÁFICA 8. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN DE 9.1 NTU.....	90
GRÁFICA 9. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN DE 11.8 NTU.....	96
GRÁFICA 10. CURVA DE ISOCONCENTRACIÓN DE 14.9 NTU.....	102
GRÁFICA 11. LÍNEA DE TENDENCIA Q_1 , NTU 9.1.....	103
GRÁFICA 12. LÍNEA DE TENDENCIA Q_1 , NTU 11.3.....	108
GRÁFICA 13. LÍNEA DE TENDENCIA Q_1 , NTU 14.5.....	113
GRÁFICA 14. LÍNEA DE TENDENCIA Q_2 , NTU 9.21.....	118
GRÁFICA 15. LÍNEA DE TENDENCIA Q_2 , NTU 11.6.....	123
GRÁFICA 16. LÍNEA DE TENDENCIA Q_2 , NTU 15.....	128

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESOS EN UNA PTAP.	27
FIGURA 2. PROCESOS EN UNA PTAP.	28
FIGURA 3. DIAGRAMA PARAGENÉTICO TIPOS DE SEDIMENTACIÓN.	28
FIGURA 4. DESESTABILIZACIÓN DEBIDO A COAGULANTES ARRASTRADOS POR REMOLINOS A MICRO ESCALA.	34
FIGURA 5. CURVAS ISO-PORCENTAJE DE SUSPENSIONES FLOCULENTAS.	36
FIGURA 6. VALORES CORRESPONDIENTES A: A, B Y K.	36
FIGURA 7. COLOCACIÓN DE LOTES DE COLUMNA EXPERIMENTOS REALIZADOS DE ACUERDO A LA CONCENTRACIÓN..	38
FIGURA 8. COLUMNA DE LOTE SIMPLE.	39
FIGURA 9. EJEMPLO DE RESULTADOS DE INTERPOLACIÓN E ISO-PERCENTIL.	40
FIGURA 10. SUMA DE ERRORES AL CUADRADO (SSE) Y PARÁMETROS PARA LOS DATOS EXPERIMENTALES.	41
FIGURA 11. SUMA DE ERRORES AL CUADRADO (SSE) Y PARÁMETROS PARA LOS DATOS DE LA LITERATURA.	41
FIGURA 12. CONDICIONES DE CLIMA (HÚMEDO Y SECO).	42
FIGURA 13. CONCENTRACIONES DE TSS VS TIEMPO	43
FIGURA 14. VALORES NUMÉRICOS DE LOS PARÁMETROS EN (2) PARA VARIOS DATOS DE PRUEBA DE COLUMNA DE ASENTAMIENTO	46
FIGURA 15. EFICIENCIAS DE ELIMINACIÓN.	47
FIGURA 16. EQUIPO MULTIPARAMÉTRICO MARCA CONSORT	51
FIGURA 17. REACTIVOS UTILIZADOS EN LA DETERMINACIÓN DE LA ALCALINIDAD, A LA IZQUIERDA; PROCESO DE ADICIÓN DE REACTIVOS, EN EL CENTRO Y DERECHA.	52
FIGURA 18. COAGULANTE SULFATO DE ALUMINIO TIPO A	53
FIGURA 19. ESTRUCTURA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO, A LA DERECHA; ZONA DEL VERTEDERO Y ADICIÓN DE LA SOLUCIÓN DE COAGULANTE, A LA DERECHA.	54

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1. VELOCIDAD ASCENSIONAL O INICIAL DE SEDIMENTACIÓN.	31
ECUACIÓN 2. LONGITUD RELATIVA DEL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA EN FLUJO LAMINAR CORREGIDA EN LA LONGITUD DE TRANSICIÓN.	31
ECUACIÓN 3. LONGITUD DE PLACAS.	32
ECUACIÓN 4. LONGITUD RELATIVA.	32
ECUACIÓN 5. VELOCIDAD CRÍTICA DE SEDIMENTACIÓN:	32
ECUACIÓN 6. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN EN CELDAS.	32
ECUACIÓN 7. CARGA SUPERFICIAL	32
ECUACIÓN 8. MEZCLA RÁPIDA	33
ECUACIÓN 9. ALCALINIDAD	52
ECUACIÓN 10. PORCENTAJE DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE PARTÍCULAS	65
ECUACIÓN 11. PORCENTAJE DE EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN	66
ECUACIÓN 12. PORCENTAJE DE EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN	67
ECUACIÓN 13. PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN	68
ECUACIÓN 14. PORCENTAJE DE EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN	68
ECUACIÓN 15. EFICIENCIA.....	70
ECUACIÓN 16. EFICIENCIA.....	70
ECUACIÓN 17. EFICIENCIA.....	71

INTRODUCCIÓN

En el proceso de desarrollo de las comunidades que habitan la tierra, se ha podido observar el gran número de muertes que se han presentado debido a la contaminación que presenta el agua; ya que el consumo de este líquido es vital para que los seres humanos subsistan.

Desde la fuente que origina su nacimiento, el agua cuenta con parámetros, que hacen que ésta no sea apta para el consumo humano; es por esta razón que se han venido estudiando e implementando métodos que contribuyan con el mejoramiento de la calidad del agua. Hoy en día, las grandes ciudades se esfuerzan por entregar a los pobladores agua que no afecte su salud, por esto encontramos las plantas de tratamiento de agua potable.

Es común encontrar que en las plantas de tratamiento de agua potable se realicen una serie de procedimientos, con el fin de obtener agua de óptima calidad para el consumo humano.

Para este proyecto se estudió uno de estos procesos llevados a cabo en las plantas de tratamiento, que tiene como finalidad la eliminación de las partículas coloidales presentes en el agua, esta acción se lleva a cabo por medio de la sedimentación.

De acuerdo con el tamaño y peso que presentan las partículas sólidas en una suspensión, se puede observar que algunas de estas no se sedimentan por acción de la fuerza de gravedad, es por esto que en la actualidad se encuentran 2 tipos de sedimentación, la primera de estas evalúa la sedimentación por peso propio (partículas discretas) y la segunda es la sedimentación obtenida por la aplicación de compuestos químicos como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) o cloruro férrico (FeCl_3) los cuales facilitan la unión entre las partículas suspendidas y así generar su remoción.

En este trabajo, se realizó la comparación entre las ecuaciones empíricas de sedimentación tipo II con los resultados obtenidos de las prácticas de laboratorio de turbiedad en el sedimentador lamelar, ejecutadas en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), que se encuentra en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia.

Las ecuaciones empíricas de sedimentación tipo II fueron desarrolladas por diferentes autores (Evans M.N. Chirwa, Adem Özer, Hasan Ali San y P. Piro) con el fin de determinar los porcentajes de remoción de partículas floculentas en torres de sedimentación.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

Los procesos llevados a cabo para la obtención de agua de buena calidad, apta para el consumo humano, han sido estudiados durante largos años; sin embargo aunque se han tenido avances en las últimas décadas; en la actualidad, se tienen en cuenta procesos naturales los cuales se conocen o practican desde épocas remotas, como lo es la decantación de partículas suspendidas que tienen mayor densidad que la del agua; cabe aclarar que se encontraba una gran dificultad para remover las partículas con densidades menores, las cuales no son sedimentables, por tal razón, fue necesario evaluar nuevos métodos que permitieran la remoción de estas partículas; la coagulación permite la unión entre coloides de menor tamaño, empleando coagulantes químicos los cuales ayudan a estas partículas a adherirse unas a otras y conformar floc de un mayor peso y tamaño para que de esta forma pueda ser eliminado en las estructuras de una planta de tratamiento.

El método convencional utilizado para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas en sedimentación tipo II, normalmente se realiza empleando una torre de sedimentación experimental; el procedimiento se realiza en laboratorio y consiste en los siguientes pasos:

1. Adicionar agua con una determinada turbidez (agua problema) a la torre de sedimentación cilíndrica que puede ser de vidrio o de plástico.
2. Es necesario que la estructura de la columna de sedimentación presente salidas equidistantes con el fin de poder tomar los datos a cada una de sus salidas, en un determinado intervalo de tiempo; en cada muestra se toman los datos de sólidos suspendidos totales o en su defecto turbidez.
3. Con los datos tomados anteriormente de una muestra representativa, la cual debe presentar condiciones de reposo, homogeneidad y su temperatura no debe variar más de 1°C a través de la altura de la columna; se realiza un esquema en papel milimetrado de la gráfica de profundidad contra tiempo, y se unen con una línea los puntos de igual remoción, la cual es llamada Curva de Isorremoción.

Uno de los avances que se han tenido en la remoción de partículas coloides del agua, es la coagulación química o la aglutinación de éstas, por medio de coagulantes que permiten formación de partículas de mayor tamaño y peso, para que de esta manera se presente la decantación y eliminación de las mismas.

1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Cuál sería la diferencia existente entre el cálculo del porcentaje de remoción de partículas floculentas comparando el método gráfico convencional y las ecuaciones empíricas de Evans M.N. Chirwa, Adem Özer, Hasan Ali San y P. Piro con porcentajes de remoción de un sedimentador lamelar?

Para tratar el agua, es necesario conocer, analizar y aplicar técnicas que contribuyan en la eliminación total o parcial de sólidos suspendidos en el agua. A partir de los datos de turbiedades iniciales y finales obtenidos en la planta de tratamiento de agua potable, se calculó la eficiencia de remoción de la misma, posteriormente se calcularon los parámetros: tiempo de sedimentación y profundidad; estos fueron aplicados a las ecuaciones empíricas propuestas por los diferentes autores (Evans M.N. Chirwa, Adem Özer, Hasan Ali San y P. Piro), con el fin de obtener la eficiencia de remoción, una vez obtenidos los dos resultados se comparó cuál de las eficiencias de los diferentes autores se acerca más a los datos de eficiencia reales.

Las ecuaciones propuestas por los diferentes autores (Evans M.N. Chirwa, Adem Özer, Hasan Ali San y P. Piro), se utilizan en algunos casos para el predimensionamiento de tanques de sedimentación en plantas de tratamiento de agua potable reales, es importante mencionar, que los tanques de sedimentación difieren notablemente en capacidad y tamaño de las torres de sedimentación las cuales fueron utilizadas para la obtención de datos que contribuyeran con el estudio desarrollado para determinar ecuaciones que predijeran el porcentaje de remoción.

Por esta razón se hace importante el desarrollo de esta investigación, con la cual se podrá identificar cuál de las ecuaciones propuestas por los autores arriba mencionados, arroja un resultado de porcentaje de remoción cercano al encontrado en el sedimentador lamelar de la planta de tratamiento de la Universidad Católica de Colombia.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Comparar los porcentajes de remoción obtenidos mediante el método convencional y las ecuaciones empíricas para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas floculentas con los resultados de un sedimentador lamelar que se encuentra ubicado en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Preparar la planta de tratamiento que se encuentra ubicada en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia, para la potabilización del agua, teniendo como referencia las turbiedades del agua cruda tratada en plantas de potabilización en los municipios del departamento de Cundinamarca.
- Verificar las ecuaciones de *Evans MN Chirwa et al*, *Hasan Ali San*, *P Piro et al*, *Adem Özer*; que predicen el comportamiento de la remoción de partículas floculantes en condiciones de flujo continuo.
- Comparar las características de remoción de partículas floculentas con los diferentes métodos (convencional, gráfico y ecuaciones empíricas) con el fin de determinar las diferencias entre una sedimentación en condiciones estáticas y la sedimentación en condiciones dinámicas.
- Comparar la eficiencia en la remoción de partículas floculentas con los diferentes métodos (convencional, gráfico y ecuaciones empíricas) con el fin de mejorar las características de diseño de los sedimentadores.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Debido a la importancia del proceso de la Sedimentación Tipo II en una planta de tratamiento de agua potable, es preciso confrontar el cálculo del porcentaje de remoción de partículas floculentas por medio del método convencional y las ecuaciones empíricas propuestas por Evans M.N. Chirwa, Hasan Ali San, P Piro et

al y Adem Özer con los porcentajes de remoción de un sedimentador lamelar a escala de laboratorio.

Se ve la necesidad de realizar el presente trabajo teórico-práctico con el fin de ejecutar una evaluación de cada uno de los métodos anteriormente mencionados, para posteriormente determinar las diferencias que se encuentran entre una sedimentación en condiciones estáticas y la sedimentación en condiciones dinámicas con el fin de mejorar las características de diseño de los sedimentadores.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1. Limitaciones

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó el sedimentador lamelar, que se encuentra ubicado en el laboratorio de aguas de la Universidad Católica de Colombia; con el fin de determinar a partir de los datos obtenidos, el porcentaje de remoción de este sedimentador y posteriormente evaluar con estos datos la remoción en el sedimentador convencional (sedimentador de torre) usando las curvas de isoconcentración, tomadas del trabajo de grado *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de SAM para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”*; de igual forma con los mismos datos evaluar las ecuaciones empíricas propuestas por Evans MN Chirwa et al, Hasan Ali San, P Piro et al y Adem Özer; para de esta manera conocer que tan cercanos son los porcentajes de remoción de las ecuaciones empíricas con los obtenidos del sedimentador lamelar.

Se requirió establecer las turbiedades a alcanzar para el proceso de funcionamiento de la planta, las cuales están establecidas para el departamento de Cundinamarca y se encuentran entre 13.00 y 15.07 NTU².

² SÁNCHEZ, Andrés y SOTELO, Diego. Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de SAM para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería. Modalidad Investigación, 2018.

Estas turbiedades se obtuvieron con la utilización de bentonita (arcilla activada que ayuda a generar una mayor turbiedad) y que permitió desarrollar la investigación.

1.6. MARCO DE REFERENCIA

1.6.1. Marco Teórico

1.6.1.1. Partículas Coloidales

Son aquellas que presentan un diámetro lo suficientemente pequeño y que se encuentran suspendidas en el agua, razón por la que el agua presenta ciertas características en cuanto a su color y/o turbiedad.

Debido a los tamaños que este tipo de partículas presenta, estas tienen un nivel muy bajo de sedimentación, por tal motivo en los procesos de purificación del agua, se hace necesario recurrir a prácticas como la coagulación y/o sedimentación, para lograr la eliminación del fluido.

Los coloides presentan diámetros que oscilan entre 0,0001 y 0,000001 mm; y buenas características de absorción para iones libres debido a la relación superficie volumen, en donde se puede encontrar la presencia de la carga electrónica que origina fuerzas de repulsión.

Estas partículas se pueden originar por la erosión, la descomposición de materia orgánica, disolución mineral de sustancias, aguas residuales, entre otros.

- Los coloides que producen en el agua coloración se les denomina, coloides hidrofóbicos y se originan de la materia orgánica, se caracterizan por que alrededor de ellos se crean enlaces de hidrógeno con las moléculas del agua y estos enlaces se oponen a la unión con los demás coloides.
- Los coloides hidrofílicos tienen su origen de minerales, presentan cargas negativas concentradas en su superficie, lo que no permite la aglomeración con las demás partículas.

1.6.1.2. Plantas de Tratamiento

Las plantas de tratamiento de agua potable, son estructuras empleadas para el tratamiento de agua cruda a nivel mundial, ya que el agua para consumo humano exige una gran pureza para evitar enfermedades en masa del tracto digestivo; en Colombia, Bogotá es considerada como una de las ciudades que suministra el agua más libre de impurezas a sus ciudadanos, pero existen poblaciones con escasos recursos hídricos y económicos, que reciben el líquido y a este únicamente se le aplica cloro en su proceso de potabilización; esta agua suministrada no es 100% libre de impurezas, y en algunos seres humanos causa enfermedades estomacales.

El tratamiento de aguas comprende una serie de acciones y/u operaciones físico químicas, las cuales dependen de su origen y la calidad de la fuente que origina el agua a tratar; para realizar estas acciones de purificación del agua, es necesario contar con una instalación de la planta en la cual se puedan aplicar las operaciones.

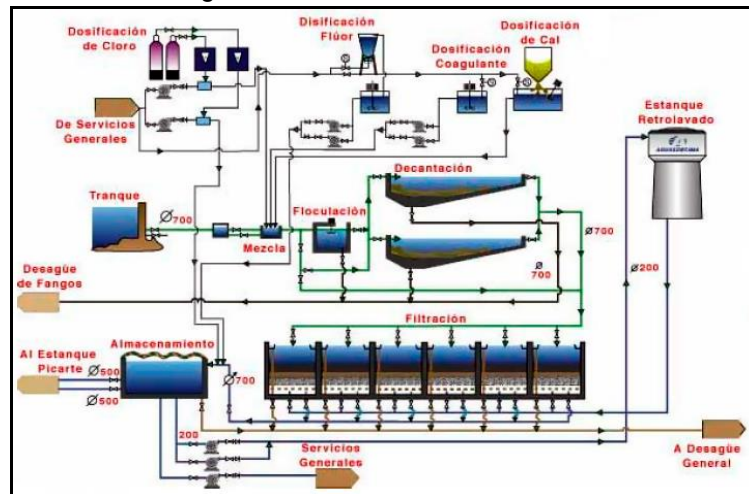
De acuerdo con la solicitud referente al uso, el tratamiento de agua está ligado al requerimiento realizado. Para atender estos requerimientos podemos encontrar diferentes tipos de plantas de tratamiento de agua como:

- Plantas de tratamiento convencional de agua (agua potable): Tiene como objetivo retirar en su gran mayoría los contaminantes presentes en el agua que se trata. Se llevan a cabo todos los procesos necesarios para la obtención de agua potable: (coagulación, mezcla rápida, floculación, sedimentación, clarificación, filtrado y desinfección); también se le puede llamar planta de ciclo completo.
- Plantas de tratamiento compactas (industriales): Cuentan con sistema de floculación en medios porosos, reduciendo el uso de productos químicos, su innovación tecnológica es mayor.
- Plantas de tratamiento modular (potabilizadoras): Son planta que ocupan poco espacio pero que si es necesario se pueden ampliar fácilmente por módulos de clarificación y de filtración; comúnmente son usadas para aguas de pozos profundos que presentan contenido de hierro y manganeso. Pueden ser operadas por gravedad o automatizadas para una operación virtual y autónoma.

Se clasifican en 3 etapas:

1. Tratamiento residual primario: En esta etapa se da la separación de sólidos mediante cribas y sedimentación, este proceso puede o no comprender el uso de coagulantes y floculantes.
2. Tratamiento residual secundario: En esta etapa se usan bacterias con el fin de que la materia biológica se vuelva bio-masa sólida, para tratar los sólidos suspendidos y disueltos.
3. Tratamiento residual terciario: En esta etapa el efluente del tratamiento de agua residual puede ser vertido al suelo, o empleado como fertilizante, pero este debe de cumplir con condiciones de vertimientos.

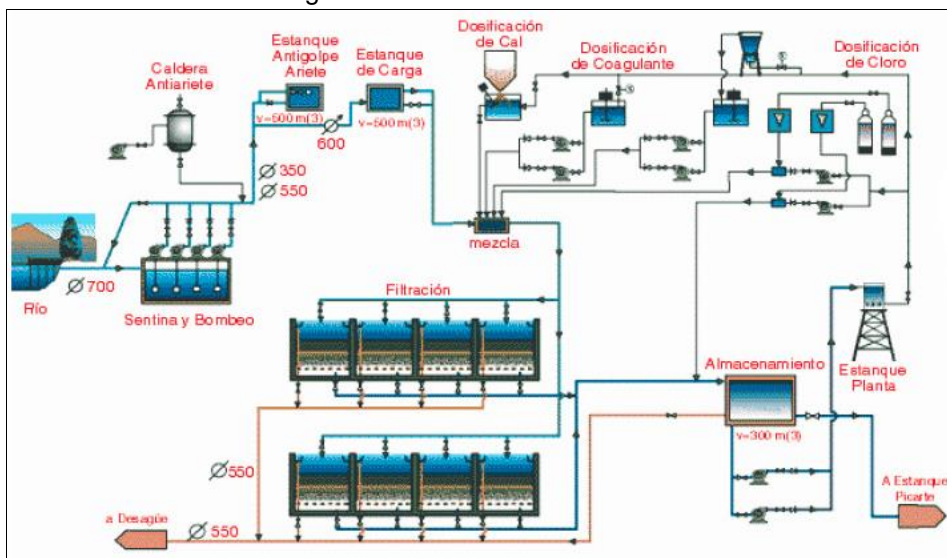
Por medio de la siguiente imagen se muestran todos los procesos que se llevan a cabo en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP).

Figura 1. Procesos en una PTAP.³

Fuente: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=plantas+de+tratamiento+de+agua+potable>

³ Fuente: <https://www.google.com/search?client=firefox-b&q=plantas+de+tratamiento+de+agua+potable>

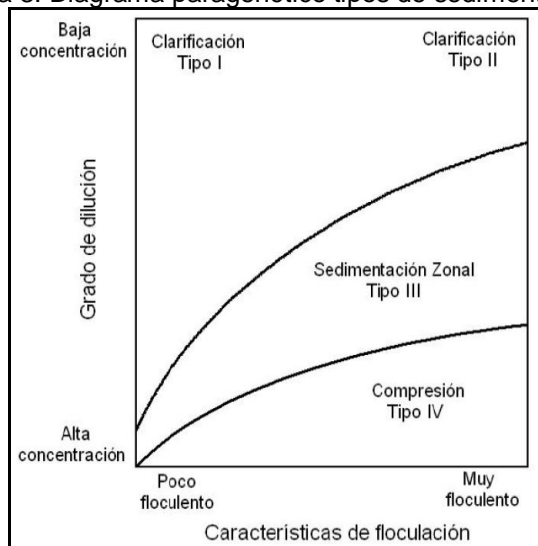
Figura 2. Procesos en una PTAP.



Fuente: <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=plantas+de+tratamiento+de+agua+potable>

1.6.1.3. Sedimentación

Figura 3. Diagrama paragenético tipos de sedimentación.⁴



Fuente: Purificación del Agua – Jairo Romero R.

⁴ Purificación del Agua - Romero Rojas Jairo Alberto

Mediante el efecto de la fuerza de gravedad, las partículas que se encuentran suspendidas en un fluido, pueden ser separadas de éste, ya que los sólidos presentan una mayor densidad que el agua; por el efecto de la fuerza de la gravedad estos pueden descender hasta el fondo de una estructura de sedimentación y de allí poder ser removidos del fluido, de esta manera contribuir en el proceso de la potabilización del agua empleado en las plantas de tratamiento.

En la sedimentación se presentan número variado de acciones, que están ligadas al tipo y la concentración de partículas en suspensión en un fluido; a continuación, se muestra el resumen de los diferentes modelos del proceso de clarificación por sedimentación:

Tabla 1. Diferentes modelos del proceso de clarificación por sedimentación.⁵

Clarificación por sedimentación tipo	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso	Ejemplos
1	Partículas discretas y aisladas en soluciones diluidas	No hay interacción entre las partículas y entre las partículas y el resto del fluido	Movimiento de sedimentación de partículas en sedimentadores o pre sedimentadores.
2	Partículas aglomerables en soluciones relativamente diluidas	Las partículas se aglomeran agrupándose en partículas en mayor tamaño	Sedimentación de flocs en decantadores horizontales o de placas
3	Soluciones de concentración intermedia	Las partículas interfieren entre sí en su descenso manteniendo posiciones estables	Deposición de lodos en decantadores de flujo ascendente
4	Soluciones de	Se forma una	Compactación de

⁵ Teoría y práctica de la purificación del agua - Arboleda Valencia Jorge.

Clarificación por sedimentación tipo	Características de los sólidos en suspensión	Descripción del proceso	Ejemplos
	alta concentración	estructura entre las partículas que va modificándose lentamente con el tiempo	depósito de lodos

Fuente: Teoría y práctica de la purificación del agua - Arboleda Valencia Jorge.

De acuerdo con el origen, la concentración y la presencia o ausencia de material floculante de los sólidos, se encuentran diversas formas de sedimentación, una de ellas es la sedimentación tipo I, la cual presenta remoción de partículas antes de generarse la coagulación y sus partículas no cambian durante el proceso de descenso ni de forma ni de tamaño, y que además su movimiento se puede ver representado por una recta negativa con pendiente constante; por otro lado la sedimentación tipo II, presenta la remoción de partículas floculentas, que se generan con la aplicación de un compuesto químico, el cual hace que las partículas se unan unas con otras, ganando peso y por ende aumentando su tamaño, haciendo que su descenso sea más rápido.

Para realizar el procedimiento de la sedimentación tipo II, se debe conocer el concepto de la floculación, la cual hace referencia a la adición de material coagulante mediante la agitación lenta al fluido tratante con el fin de unir las partículas suspendidas y aumentar su masa para de esta manera poder decantarla.

De manera diferente, se presenta la sedimentación tipo III, que, mediante su concentración intermedia, presenta un asentamiento interferido debido a la cercanía entre partículas, haciendo que todos los coloides se precipiten en el mismo momento como un solo bloque creando una interfase clara de separación entre el sobrenadante clarificado y el lodo.

Finalmente, la sedimentación por compresión (Tipo IV), es aquella en donde la concentración aumenta haciendo que las partículas se encuentren en contacto físico unas con otras creando una sola masa, la cual se precipita hacia el fondo de la planta de tratamiento, observando que el peso entre ellas es sostenido parcialmente por la masa compacta.

1.6.1.4. Sedimentación de Flujo Laminar o Alta Rata (Tasa)

Dependiendo del diseño que se quiere realizar para un sedimentador, se encuentran las siguientes diferencias entre un sedimentador convencional y un sedimentador laminar: ⁶

- El fondo del decantador no es horizontal sino inclinado
- La profundidad del decantador es muy baja (unos pocos centímetros) de forma que hay que construir un número considerable de celdas superpuestas para poder tratar los volúmenes de agua que se acostumbra en la práctica
- El flujo en el decantador es laminar con N_R menos de 500

El sedimentador lamelar o de alta tasa presenta las siguientes ecuaciones para su correspondiente interpretación:

Ecuación 1. Velocidad ascensional o inicial de sedimentación.

$$v_o = \frac{Q}{A * \text{Sen}\theta}$$

Donde:

v_o = Velocidad inicial de sedimentación

Q = Caudal a tratar

A = Área útil de sedimentación

θ = Angulo de inclinación de las lamelas

Ecuación 2. Longitud relativa del sedimentador de alta tasa en flujo laminar corregida en la longitud de transición.

$$L_c = L - L'$$

Donde:

L = Longitud de placas

⁶ Teoría y práctica de la purificación del agua - Arboleda Valencia Jorge.

L' = Longitud relativa

El valor de las variables L y L' , se puede obtener a partir de las siguientes expresiones respectivamente:

Ecuación 3. Longitud de placas.

$$L = \frac{l}{d}$$

Donde:

l = Alto de las placas

d = Separación entre placas

Ecuación 4. Longitud relativa.

$$L' = \frac{0.013 * v_o * d}{\vartheta}$$

Donde:

v_o = Velocidad inicial de sedimentación

d = Separación entre placas

ϑ = Viscosidad cinemática

Ecuación 5. Velocidad crítica de sedimentación:

$$V_{sc} = \frac{S_c * v_o}{\text{Sen}\theta + L_c * \text{Cos}\theta}$$

Donde:

S_c = Coeficiente para el tipo de sedimentador de placas paralelas planas. $S_c = 1$

Ecuación 6. Tiempo de concentración en celdas.

$$t_c = \frac{l}{v_o}$$

Ecuación 7. Carga superficial

$$C_s = v_o * 1.5$$

Donde:

1.5 = Factor de seguridad

1.6.1.5. Mezcla Rápida – Coagulación

En comparación con la floculación o mezcla lenta, la coagulación o mezcla rápida, se realiza mediante la desestabilización de los sólidos por medio de intensas agitaciones con el fin de que las partículas coloidales se unan unas con otras y de esta manera ganar masa, para así precipitarse al fondo de la planta de tratamiento de agua y realizar su correspondiente eliminación.

Existen para la práctica en la eliminación de partículas suspendidas los siguientes métodos:

- Mezcla Rápida Para Coagulación de BARRIDO: para este procedimiento, el agua que se va a tratar, se sobresatura en 3 o 4 órdenes de magnitud, adicionando el hidróxido pues de esta manera se precipita con mayor rapidez. Se tiene la siguiente relación empírica, con el fin de optimizar las operaciones de mezcla rápida:

Ecuación 8. Mezcla rápida

$$G \cdot T^* \cdot C^{1.46} = 5.9(10)^6$$

Donde:

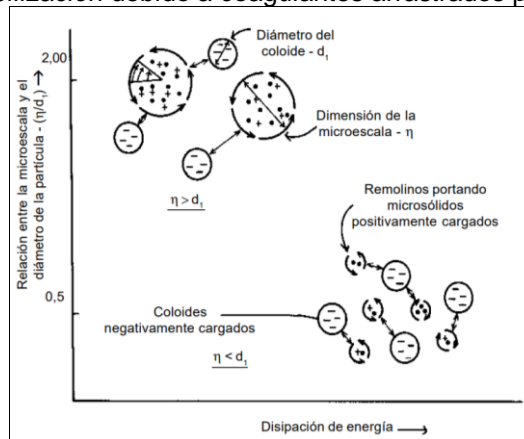
G = Gradiente de velocidad promedio en s^{-1}

T^* = Tiempo óptimo de mezcla rápida en segundos

C = Dosis de coagulante en mg/L

- Mezcla Rápida Turbulenta Para Neutralización de Cargas: Este procedimiento se realiza con la adición de pequeñas dosis Sulfato de aluminio con pH muy bajo, el cual forman especies hidrolíticas cargadas positivamente las cuales son arrastradas rápidamente por los remolinos de la turbulencia de dimensiones a micro escala con el fin de que interactúen con las partículas de la suspensión coloidal, ocasionando desestabilización de coloides.

Figura 4. Desestabilización debido a coagulantes arrastrados por remolinos a micro escala.



Fuente: Purificación del Agua – Jairo Romero R.

- **Mezcla Rápida Con Polímeros:** Para este procedimiento, los mecanismos de coagulación predominantes son los polímeros orgánicos, de neutralización de la carga y puente interparticular, además, con este procedimiento no es necesario utilizar altos valores de gradientes de velocidad, los cuales se encuentran entre 400 a 800 s⁻¹ y tiempos de retención de 60 a 30 segundos.

1.7. ESTADO DEL ARTE (Ecuaciones Empíricas)

En la actualidad se pueden encontrar varios tipos de sedimentación de acuerdo a los procesos de coagulación que se vayan a llevar a cabo en una planta de tratamiento. Para el desarrollo de este proyecto se tomará como base la sedimentación tipo II, y se estudiarán, evaluarán y compararán las ecuaciones planteadas por los siguientes autores:

- Hasan Ali San.
- Evans M.N. Chirwa et al.
- P Piro et al.
- Adem Özer.

Cabe resaltar, que, de acuerdo con los artículos escritos por los autores arriba citados, en la actualidad no se han encontrado estudios dedicados a comparar y evaluar las diferencias entre los resultados del porcentaje de remoción de partículas floculantes obtenidos mediante el método gráfico de la torre de

sedimentación, el método convencional, las ecuaciones empíricas y un caso real de un sedimentador lamelar, de allí surge el presente planteamiento de proyecto. A continuación, se presenta una breve descripción de los estudios realizados por los autores anteriormente mencionados.

1.7.1. Enfoque Analítico para la Evaluación de la Configuración de los Datos de Columna (Hasan Ali San)⁷

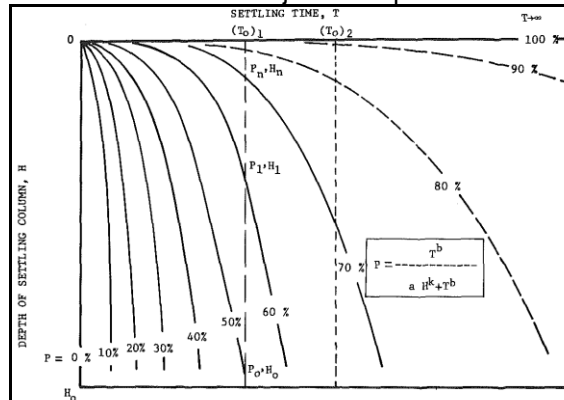
De acuerdo con Hasan Ali San en su texto ***“Enfoque Analítico Para La Evaluación De La Configuración De Los Datos De Columna”***, los métodos gráficos para determinar la relación de extracción de sólidos suspendidos, propuestos por Eckenfelder 1966; O'Connor y Eckenfelder 1961; Zaroni y Blomquist 1975, tienden a ser engorrosos y, en ocasiones, confusos, por lo que el autor considera que una ecuación matemática adecuada que describa las propiedades de asentamiento de una suspensión en cuestión, simplificará el procedimiento de diseño de tanques de sedimentación y también permitiría la aplicación de técnicas informáticas a este proceso.

Partiendo de esta premisa, el estudio desarrollado por Ali San busca obtener una ecuación matemática para curvas de iso-porcentaje para asentamiento inactivo, y toma como punto de partida publicaciones previas de los resultados de las pruebas de columna de asentamiento y el desarrollo de experimentos de sedimentación para suspensiones de arcilla floculadas con cloruro férrico.

El método gráfico de curvas de iso-porcentaje de suspensiones floculantes, establece que los valores de porcentaje, P , son una función del tiempo de sedimentación T y la profundidad H , conforme se evidencia en la siguiente figura:

⁷ *Analytical approach for evaluation of settling column data. - Hasan Ali San*

Figura 5. Curvas Iso-Porcentaje de Suspensiones floculentas⁸



Fuente: Hasan Ali San

La correlación existente entre los porcentajes de suspensión (P), el tiempo (T) y la profundidad (H) es expresada de la siguiente manera:

$$P = \frac{T^b}{aH^k + T^b}$$

Donde a, b, y k corresponden a parámetros específicos de una suspensión dada a determinar.

Figura 6. Valores correspondientes a: a, b y k

Test number (1)	a (2)	b (3)	k (4)	k/b (5)	$\alpha = 1$ - k/b (6)	R_c (7)	E_s (8)	Related reference (9)
1	3.476	0.505	0.153	0.303	0.697	0.910	5.5	Eckenfelder (1966) ^a
2	0.404	0.943	0.984	1.043	—	0.976	4.1	Eckenfelder (1966) ^b
3	0.275	0.834	0.877	1.051	—	0.946	5.0	O'Connor (1961) ^a and
4	5.808	1.080	0.361	0.334	0.666	0.945	5.7	Eckenfelder (1961) ^{a,b}
5	0.785	1.234	0.939	0.761	0.239	0.990	3.1	Reynolds, T. D. (1982) ^a
6	0.632	1.005	0.860	0.856	0.144	0.986	2.8	Reynolds, T. D. (1982) ^b
7	25.088	2.025	0.716	0.353	0.647	0.997	2.2	Camp, T. R. (1946) ^a
8	20.409	1.315	0.347	0.264	0.736	0.968	5.7	San (1980) ^a
9	33.692	1.209	0.368	0.307	0.693	0.992	1.8	Zanoni, A. E. (1975) ^a
10	1.212	0.844	0.329	0.389	0.611	0.991	0.5	Berthouex (1982) ^a
11	0.227	2.140	2.140	1.000	0	0.999	1.9	Camp, T. R. (1946) ^b
12	0.0724	2.775	2.775	1.000	0	0.994	3.5	Huisman, L. (1972) ^b

^aFlocculent particles.
^bDiscrete particles.

Fuente: Hasan Ali San

⁸ *Ibíd.*, p.2.

A través de diferentes equivalencias y demostraciones matemáticas, el autor obtiene de manera empírica la siguiente ecuación, denominada “Ecuación De Extracción De Sólidos Globales”:

$$R = P_0 \left[1 + \frac{1!(1 - P_0)^1}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)} + \frac{2!(1 - P_0)^2}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)\left(2 + \frac{1}{k}\right)} + \frac{3!(1 - P_0)^3}{\left(1 + \frac{1}{k}\right)\left(2 + \frac{1}{k}\right)\left(3 + \frac{1}{k}\right)} \dots \right]$$

El uso de esta ecuación mediante la aplicación del algoritmo propuesto permite establecer resultados analíticos, que posteriormente son comparados con resultados gráficos, a fin de comprobar la efectividad y usabilidad de la ecuación. Concluye el autor entonces que la ecuación refleja el comportamiento de las curvas de iso-porcentaje mediante una expresión en forma de serie convergente que determina la eficiencia de eliminación de sólidos en general, mediante un procedimiento unificado que permite determinar las eficiencias generales de eliminación de sólidos.

1.7.2. Simulación Computacional de la Sedimentación Floculante Basada en Resultados Experimentales (Evans M.N. Chirwa y Otros)⁹

Para el desarrollo de este estudio fue necesario desarrollar algoritmos de interpolación computarizados y también desarrollar el modelo empírico para analizar los datos de asentamiento floculante.

El modelo desarrollado por Evans Chirwa y otros, tomó como referencia los modelos planteados por Özer y Sam, los cuales están basados en parámetros ajustables (α_1 , α_2 , α_3 , A_1 , A_2 y A_3 ; α_i , β y k) respectivamente; esto les permitió desarrollar un modelo modificado para evaluar los datos de columna de asentamiento.

Para el estudio realizado fueron necesarios, una columna de lote simple con una profundidad entre 2,5 y 4 m para la recopilación de los datos físicos, un tanque de

⁹ A finite velocity simulation of sedimentation behaviour of flocculating particles (Evans M.N. Chirwa y otros)

mezcla de 100 l, junto con un agitador para mezclar agua con sulfato de aluminio (coagulante), tierra de arcilla seca, un vaso de precipitados de 5 l y recipientes de muestreo para extraer las muestras de la columna en un momento dado.

El proceso realizado conllevó a realizar la simulación de la turbiedad del agua, para lo cual se mezclaron en el tanque 90 l de agua y aproximadamente 400 g de tierra de arcilla seca; luego se añadió el coagulante y se encendió el agitador durante 2 minutos a 180 rpm, pasados 20 minutos se transfirió la solución a la columna de sedimentación experimental. Las muestras de los 7 puertos de muestreo se retiraron a los 0, 10, 20, 30, 45, 60, 75 y 90 min.

Las muestras tomadas en los puertos fueron analizadas en un medidor de turbidez y los datos obtenidos se analizaron con la ayuda de la plataforma de software de programación Octave (GNU Octave versión 3.4.2, Free Software Foundation, Boston, MA), se generó un algoritmo de interpolación y posteriormente se computarizó para generar las curvas de iso-porcentaje en función de la profundidad y el tiempo de retención.

En la siguiente tabla se muestran los 5 experimentos realizados, con diferentes tipos de concentración de coagulante:

Tabla: Experimentos en columna de asentamiento por lotes realizados

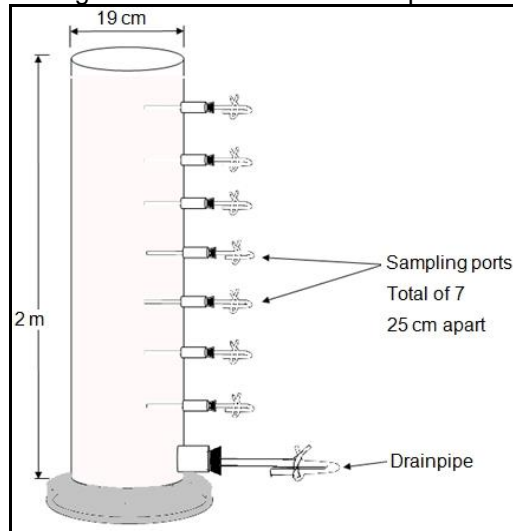
Figura 7. Colocación de lotes de columna experimentos realizados de acuerdo a la concentración.¹⁰.

Experiment No.	Coagulant concentration (mg/L)	Average initial solids concentration (NTU)
1	10	195
2	50	208
3	70	170
4	68	112
5	70	141

Fuente: Evans M.N. Chirwa y Otros

¹⁰ Ibíd., p.2.

Figura 8. Columna de lote simple.¹¹



Fuente: Evans M.N. Chirwa y Otros

Estos perfiles de eliminación iso-percentil individuales se calcularon a partir de la relación geométrica entre el porcentaje de eliminación y la altura de la columna en cualquier momento en particular aplicando la siguiente fórmula:

$$H_i = H_{max} + r_1 P * t^{r_2}$$

Donde r_1 y r_2 son parámetros optimizables semi-empíricos, H_i es la altura de los puntos de muestreo, H_{max} es la altura de diseño del tanque propuesto, y P es el porcentaje de remoción $(1 - X_j / X_o) \times 100$.

El modelo fue modificado posteriormente a la ecuación final, en esta se tuvo en cuenta un parámetro de aptitud adicional r_3 .

$$H_i = H_{max} + r_1 P^2 t^{r_2} - r_3 P^2 t$$

Esta ecuación se puede reorganizar y escribir de la siguiente manera con la gama completa de parámetros:

¹¹ Ibíd., p.2.

$$P = \left(\frac{-D}{r_1 * t^{r_2} - r_3 * t} \right)^{0,5}$$

$$D = H_{max} - H_i$$

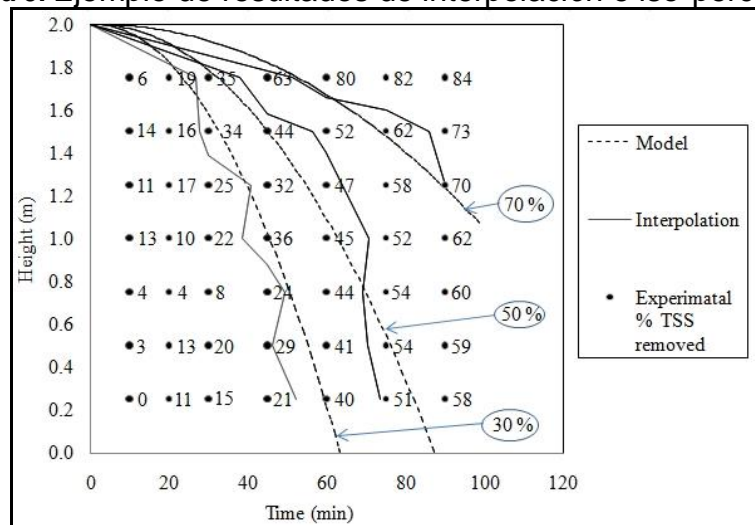
$$r_1 < 0$$

$$r_2 > 0$$

$$0 \leq r_3 \sim \frac{0,1}{r_2}$$

A continuación, se pueden ver en la siguiente gráfica encerrados en círculos los datos experimentales, después de calcular los porcentajes de eliminación

Figura 9. Ejemplo de resultados de interpolación e iso-percentil.¹²



Fuente: Evans M.N. Chirwa y Otros

En las siguientes tablas se pueden observar los parámetros propuestos experimentales del autor, así como los datos tomado de la literatura, los cuales son útiles para reemplazar en la ecuación final propuesta.

¹² Ibíd., p.7.

Figura 10. Suma de errores al cuadrado (SSE) y parámetros para los datos experimentales.¹³

Experiment No.	Proposed model				Özer's model			
	r_1 ($\times 10^{-3}$)	r_2	r_3 ($\times 10^{-3}$)	SS _E	α_1	α_2	α_3	SS _E
1	-0,94	2,141	0,00328	3,62	4,1	0,45	-0,53	9,58
2	-0,7	2,09	0,000041	1,71	4,35	0,46	-0,512	3,23
3	-0,7501	2,2	0,02911	3,58	4,5	0,69	-0,56	8,59
4	-0,751	2,048	0,01681	1,71	4	0,5	-0,48	4,65
5	-1	2,4	15,7	3,52	2,8	0,65	-0,51	13,54

Fuente: Evans M.N. Chirwa y Otros

Figura 11. Suma de errores al cuadrado (SSE) y parámetros para los datos de la literatura.¹⁴

Data Source	Proposed model				Özer's model			
	r_1 ($\times 10^{-3}$)	r_2	r_3 ($\times 10^{-3}$)	SS _E	α_1	α_2	α_3	SS _E
Je <i>et al</i> (2007)	-1,3	1,64	71	1,31	2,439	0,55	-0,441	1,34
Reynolds & Richards (1996)	-0,76	2,101	118	1,49	1,91	0,55	-0,44	3,72
Berthouex & Stevens (1982)	-1,12	2,307	540,8	1,55	1,938	0,250	-0,633	0,85
Eckenfelder (1989)	-0,002	1,0009	79	6,16	2,365	0,46	-0,428	6,70

Fuente: Evans M.N. Chirwa y Otros

En este estudio, se desarrolló un modelo mejorado que obtuvo mejores resultados que el modelo de Özer al interpretar los datos de la columna de liquidación.

1.7.3. Caracterización del Proceso de Asentamiento de Aguas Residuales de un Sistema de Alcantarillado Combinado. (P. Piro y Otros).¹⁵

Los ensayos de columna de sedimentación se usan con mayor frecuencia, debido a su simplicidad y bajo costo; son muy similares a los procesos de asentamiento reales y permiten evaluar la eliminación de sólidos totales (TSS), mediante el asentamiento.

Para realizar el ensayo recolectaron muestras de agua de la cuenca del canal Liguori (LC) en Cosenza Italia, al ser estas aguas residuales que contienen

¹³ *Ibíd.*, p.9.

¹⁴ *Ibíd.*, p9.

¹⁵ *Chara.cterization of the settling process for wastewater from a combined sewer system* (P. Piro y Otros)

muchos contaminantes entre ellos metales pesados, estas aguas fueron sometidas a pruebas de columna de sedimentación.

Para el diseño de asentamientos es de gran importancia conocer la velocidad de asentamiento, la cual se puede determinar de manera experimental por medio de una variedad de procedimientos, que se pueden calcificar en dos categorías:

- Dispositivos de asentamientos inactivos (varios tipos de columnas de asentamiento).
- Dispositivo de asentamiento dinámico, (el líquido está sometido a turbulencias generadas mecánicamente).

El ensayo se realizó con el fin de examinar los datos de columna de asentamiento, para proponer una metodología de diseño computacional simple. El muestreo se llevó a cabo durante dos años de allí salieron 15 eventos los cuales se dividen en condiciones de clima seco (DW), y condiciones de clima húmedo (WW); estos eventos se presentan en la siguiente tabla.

Se utilizó una columna de sedimentación estacionaria de 150 mm de diámetro, y tres (3) metros de profundidad, con 5 puertos de muestro.

Las muestras tomadas en este estudio fueron de 100 ml de cada puerto con intervalos de tiempo de 5 minutos, y a su vez tuvo una duración total de 40 minutos.

Figura 12. Condiciones de clima (húmedo y seco). ¹⁶

Table 1 – Division of the tests into dry and wet weather conditions.	
DW	WW
24 October 2007	2 April 2008
23 April 2008	13 January 2009
14 May 2008	18 February 2009
11 June 2008	11 March 2009
9 July 2008	20 March 2009
16 July 2008	21 April 2009
	28 April 2009
	22 September 2009
	23 October 2009

Fuente: P. Piro y Otros

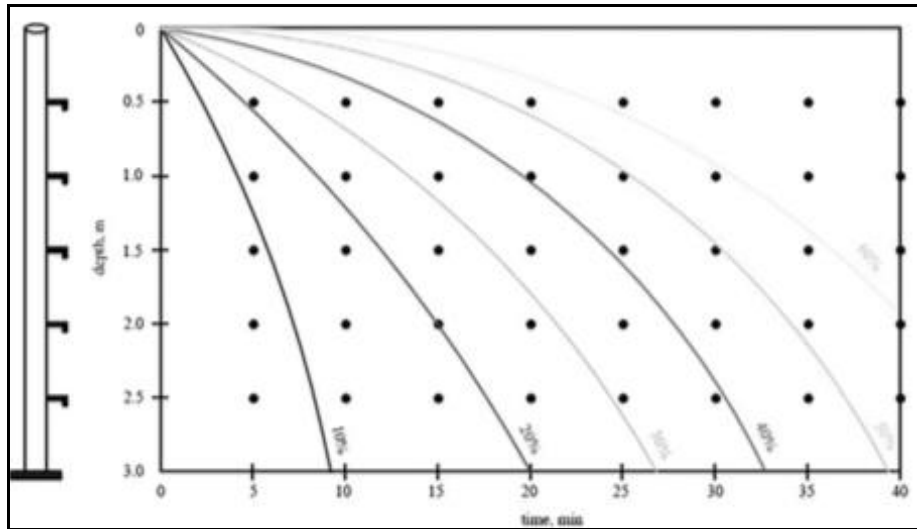
¹⁶ Ibíd., p.3.

La determinación de los sólidos suspendidos totales es necesaria para calcular las fracciones de masa eliminada en cada profundidad, por medio de la siguiente ecuación:

$$E_{ij} = \left(1 - \frac{C_{ij}}{C_0}\right) \times 100$$

Donde C es la fracción de masa, en porcentaje, que se elimina a la profundidad i en el jth intervalo de tiempo, y C₀ es la concentración inicial de TSS.

Figura 13. Concentraciones de TSS vs tiempo



Fuente: P. Piro y Otros

Los tiempos de detención de cualquier muestra real se pueden calcular con la siguiente fórmula:

$$T_{rj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N T_{ij}}{N}}$$

Donde j indica la curva de iso-remoción, N es el número total de las profundidades para las cuales se calcula el promedio de los tiempos de asentamiento para la curva de eliminación de iso; cada una de las muestras de evento, una media del error medio de la muestra se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$\overline{Err} = \frac{\sum_{j=1}^M t_{Rj}}{M}$$

M es el número de curvas de iso-remoción de la muestra con un promedio de error se adoptó como la muestra característica. Esta identificada de esta manera se puede utilizar en el diseño de las instalaciones de asentamiento.

Las curvas de iso-remoción permiten determinar las fracciones de partículas que se eliminan completamente de la columna de agua, es decir, las partículas con diámetros $d \leq d_0$, para un tiempo de detención dado. Sin embargo, la eficiencia total de remoción será mayor porque también se eliminan parcialmente algunas partículas más finas. Los resultados de las pruebas de columna se pueden utilizar para evaluar la eficiencia total de eliminación (E_{tot}) del proceso de sedimentación.

$$E_{tot} = E(\theta_H) + \sum_i (E_i - E_{i+1}) \frac{h_{i,i+1}}{H}$$

H es la profundidad de la columna, $E(\theta_H)$ es la curva de eliminación de porcentaje constante que pasa por el punto (θ_H, H) , E_i y E_{i+1} son las eficiencias de iso-remoción mayores que $E(\theta_H)$ y $h_{i,i+1}$ es la profundidad de punto medio del segmento que une las curvas E_i y E_{i+1} en $t = \theta_H$.

El conocimiento de las relaciones analíticas para cada curva de iso-remoción (es decir, $h_i = a_i \cdot t^{b_i}$), permite expresar la ecuación como:

$$\begin{aligned} E_{tot} &= E(\theta_H) + \sum_i (E_i - E_{i+1}) \frac{h_i + h_{i+1}}{2H} \\ &= E(\theta_H) + \frac{1}{2H} \sum_i (E_i - E_{i+1}) (a_i \theta_H^{b_i} + a_{i+1} \theta_H^{b_{i+1}}) \end{aligned}$$

Los parámetros a_i y b_i reflejan la variabilidad del comportamiento de asentamiento debido a las características del efluente

Finalmente, también se analizaron las variaciones en las eficiencias de eliminación de TSS del tanque de sedimentación con los parámetros a y b, y se proporcionó información para el diseño del tanque de sedimentación.

1.7.4. Ecuaciones Simples para Expresar la Configuración de Datos de Columna. (Adem Ozer)¹⁷

Para conocer los mecanismos que gobiernan el asentamiento floculante se utilizan datos experimentales y enfoques empíricos en el diseño de tanques de sedimentación, de allí que los estudios en plantas pilotos de flujo continuo parezcan ser los más razonables porque simulan mejor las condiciones reales, pero los estudios de columna de asentamiento son más fáciles de realizar y se utilizan más comúnmente, sin embargo los datos de la prueba de la columna de asentamiento se analizan mediante un método gráfico tradicional, el cual consume mucho tiempo, ya que implica trazar los valores de porcentaje de eliminación obtenidos a partir de los datos de prueba en relación con las profundidades y tiempos apropiados para luego construir líneas de eliminación de iso-porcentaje, interpolando entre valores trazados. Esta interpolación implica el uso de los puntos más cercanos, por lo que la ventaja de utilizar todos los datos se pierde.

De acuerdo a esto y conforme al análisis realizado en el documento *Ecuaciones Simples Para Expresar La Configuración De Datos De Columna* del Adem Özer, el ajuste de la curva matemática supera las dificultades que representa el uso del método gráfico. Para tal fin, el autor realiza el ajuste de dos ecuaciones simples, independientes a los porcentajes de concentración que quedan en suspensión. Los datos obtenidos en el análisis del autor son usados dentro del documento para probar la aplicabilidad de las ecuaciones ajustadas.

Para la obtención del porcentaje de remoción de partículas se toma en cuenta la siguiente ecuación:

$$(P = aH^bT^d)$$

Donde los datos característicos se determinan en la siguiente tabla:

¹⁷ Simple equations to express settling column data - Adem Özer

Figura 14. Valores numéricos de los parámetros en (2) para varios datos de prueba de columna de asentamiento

Test number (1)	Parameters of Eq. (2)			Correlation coefficient R (5)	Source of data (6)
	a (2)	b (3)	d (4)		
1	2.111	0.241	-0.457	0.98	(Weber 1972)
2	1.938	0.250	-0.633	0.988	(Berthouex 1982)
3	2.265	0.145	-0.506	0.96	(O'Connor 1961)
4	3.421	0.149	-0.448	0.98	(Zanoni 1975)
5	35.570	0.536	-1.391	0.98	(Camp 1946)
6	20.912	0.549	-1.239	0.91	(Huisman 1972)
7	140.611	1.808	-1.640	0.93	(Huisman 1972)
8	1.575	0.432	-0.366	0.94	(O'Connor 1961)
9	2.365	0.460	-0.428	0.97	(Eckenfelder 1966)

Fuente: Adem Ozer

Mediante diversas equivalencias matemáticas, el autor establece una serie de ecuaciones que permiten mejorar los resultados de los análisis de asentamiento con respecto al método gráfico. De esta forma, el autor define que, para un cierto valor de profundidad, el aumento en la eficiencia general con respecto al tiempo no cambia sustancialmente después de un tiempo de retención crítico; definiendo T_{cr} como el momento en el que hay un aumento en la retención, del 10% en media hora. En diversos ensayos adelantados por el autor, los valores de T_{cr} fueron calculados están entre 35 y 70 min, para varios datos de asentamiento. En estos cálculos, los valores de T_{cr} cambiaron en aproximadamente en 10 min cuando las profundidades variaban entre 1 y 3 m. Esto muestra que el valor de T_{cr} no cambia apreciablemente incluso cuando la profundidad es cambiada al triple.

Los valores de T_{cr} se pueden utilizar en la planificación de estudios experimentales adicionales. Son también una guía útil en el diseño de tanques reales. Por ejemplo, se pueden probar diferentes tipos de coagulantes para la misma suspensión y si los datos de la columna de sedimentación están disponibles para todos los casos, los valores de T_{cr} pueden ser un criterio simple en la selección del coagulante, siempre y cuando se obtengan eficiencias satisfactorias.

La profundidad requerida de un tanque de sedimentación se ve afectada por las dimensiones del mecanismo de recolección de lodos. Una vez que se selecciona la profundidad, el T_{cr} y la eficiencia correspondiente se pueden calcular a partir de las siguientes ecuaciones respectivamente.

$$R_0 = 1 - \frac{a H_0^b T_0^d}{b + 1}$$

$$T_{cr} = \sqrt[1-d]{-\frac{a d H^b}{(b + 1)r}}$$

Se puede considerar que esta eficiencia representa la eficiencia que se puede esperar razonablemente, para una suspensión de prueba.

El autor concluye que los datos de la prueba de columna de asentamiento se representan mediante una ecuación simple y su modificación. La aplicabilidad de estas ecuaciones se prueba con los datos dados en siete referencias, donde los parámetros de la ecuación son estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95%.

Las predicciones fuera de los datos experimentales también son confiables y la eficiencia de eliminación general se expresa en función de los parámetros de la ecuación, la profundidad y el tiempo. La definición de tiempo crítico dada en este documento puede ser útil en la planificación experimental y el diseño de tanques de sedimentación.

Figura 15. Eficiencias de eliminación.¹⁸

Time T_0 (minutes) (1)	Depth H_0 (m) (2)	Removal Efficiency R_0 (%)			Source of data (6)
		Graphical method (3)	Eq. (7) (4)	Eq. (8) (5)	
17	2.44	39	42	41	(Weber 1972)
21	2.44	47	48	47	(Weber 1972)
29	2.44	55	55	53	(Weber 1972)
37	2.44	61	60	58	(Weber 1972)
50	2.44	65	65	64	(Weber 1972)
115	2.44	70	75	79	(Weber 1972)
60	1.22	89	88	92	(Berthouex 1982)
40	3.05	32	32	32	(Zanoni 1975)
53	3.05	41	41	40	(Zanoni 1975)
72	3.05	50	48	48	(Zanoni 1975)
98	3.05	57	55	55	(Zanoni 1975)
53	2.13	41	43	44	(Zanoni 1975)
52.5	0.63	90	92	86	(Huisman 1972)
59.2	1.07	90	91	85	(Huisman 1972)
66.6	1.60	90	90	85	(Huisman 1972)
75.0	2.25	90	90	86	(Huisman 1972)
86.6	3.13	90	90	87	(Huisman 1972)

Fuente: Adem Özer

¹⁸ Simple equations to express settling column data - Adem Özer

1.8. METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente trabajo de grado, se siguió el método inductivo, teniendo en cuenta que se partió de premisas ya establecidas, como lo son las ecuaciones empíricas propuestas por los diferentes autores y las turbiedades encontradas en las diferentes plantas de tratamiento del departamento de Cundinamarca; con los cuales se hizo una comparación mediante prácticas que permitieron realizar una verificación de los que arrojaban los resultados más cercanos.

1.8.1. Fase 1: Torre de Sedimentación

En esta fase, se tomaron los mayores rangos típicos de turbiedad, definidos para el departamento de Cundinamarca, que fueron determinados en la investigación realizada por los estudiantes Andrés Ricardo Sánchez y Diego Alexander Sotelo en su proyecto de grado *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s Para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”*.

También fueron tomadas las curvas de iso-concentración para evaluar la eficiencia de remoción de este método con la obtenida del sedimentador lamelar de la planta de tratamiento.

1.8.3. Fase 2: Sedimentador lamelar

A partir de la preparación del agua, la cual contó con valores de turbiedad típicos definidos para el departamento de Cundinamarca, se obtuvieron los parámetros iniciales del agua, entre ellos se obtuvo la alcalinidad, con la cual se pudo determinar la dosificación del coagulante y posteriormente poner en funcionamiento la planta piloto de tratamiento de agua, la cual está ubicada en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia.

Se pudo establecer datos de turbiedades iniciales en el resalto hidráulico y finales a la salida del sedimentado, con estos fue posible determinar las características de remoción de sólidos en el sedimentador de la planta.

1.8.2. Fase 3: Comparación de los resultados obtenidos.

En esta fase se realizó, la comparación de los resultados obtenidos de eficiencia generados a partir de las ecuaciones empíricas encontradas en la literatura, con los porcentajes de eficiencia obtenidos del sedimentador lamelar de la planta piloto de tratamiento de agua.

Se determinaron las características de remoción de sólidos en el sedimentador de la planta piloto de la Universidad Católica de Colombia, con el fin de encontrar las diferencias entre una sedimentación en condiciones estáticas y la sedimentación en condiciones dinámicas.

1.8.4. Fase 4: Recomendaciones

Se analizó y concluyó a partir de los resultados obtenidos en el laboratorio de la universidad y los cálculos realizados, en el cual se hace referencia a las diferencias de predicción entre las ecuaciones empíricas y los métodos convencional y el sedimentador lamelar.

2. DISEÑO METODOLÓGICO

2.1. ELECCIÓN DE TURBIEDADES Y CAUDALES.

Con el fin de obtener datos reales, se tiene en cuenta información recolectada y analizada anteriormente en trabajos de grado desarrollados en la Universidad Católica de Colombia; como lo fueron algunos datos de turbiedad del agua establecidos para el departamento de Cundinamarca, estos se computaron en el proyecto de investigación *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”*.

También se consideraron, el caudal y el cálculo para la dosificación del coagulante encontrado en el proyecto *“Diseño y Construcción de una Planta Piloto Para el Tratamiento de Agua Potable en el Laboratorio de la Universidad Católica de Colombia”*.

Los datos de turbiedades que se definen, son el punto de inicio para la realización de las prácticas de laboratorio, ya que con esta información se prepara el agua problema a tratar y de esta manera, poner en funcionamiento la planta piloto y registrar los datos de turbiedades iniciales y finales.

2.2. PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA.

El agua se obtiene del tanque de almacenamiento de aguas lluvias ubicado en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia, la cual tiene una turbiedad inicial baja, que es necesario aumentar con la ayuda de bentonita hasta las unidades de turbiedad requeridas para cada uno de los ensayos en la planta piloto.

Los parámetros iniciales del agua, se toman para una muestra representativa de cada agua problema preparado, con el equipo multiparamétrico marca Consort, estos parámetros corresponden a los siguientes:

- PH
- Conductividad
- Resistividad
- Sólidos disueltos totales
- Salinidad
- Alcalinidad

- Turbiedad
- Temperatura

Figura 16. Equipo multiparamétrico marca Consort



Fuente: Autores.

2.2.1. Alcalinidad

Este parámetro es de gran importancia para el desarrollo de esta investigación, por medio de su valor numérico, se puede obtener la dosis óptima de coagulante mediante el ensayo test de jarras.

La alcalinidad es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos¹⁹, esta se puede determinar para una muestra representativa de agua problema; de la siguiente manera:

1. Se requieren los siguientes materiales y reactivos:

- Vidriería:
 - 2 Buretas de 25 ml
 - 2 Soportes universal
 - 2 Matraz o Erlenmeyer de 800 ml
 - 1 Becker en vidrio de 100 ml
 - Frasco Lavador con Agua des ionizada
 - Frasco para residuos y/o limpieza.

¹⁹ Fuente: J. Glynn Henry y Gary W. Heinke, Ingeniería Ambiental – Segunda Edición.

- Reactivos:
 - Fenolftaleína
 - Metil naranja
 - Ácido sulfúrico a una concentración de 0.02N
 - Hidróxido de sodio a una concentración de 0.02N.

2. Proceso realizado:

Tomar la muestra en un frasco de vidrio, posteriormente vaciar un volumen aproximado de 100 ml en dos Erlenmeyer y adicionar de 3 a 5 gotas del elemento indicador fenolftaleína a un Erlenmeyer y metil naranja en el otro; adicionar gota a gota el elemento titulante, ácido sulfúrico en el recipiente que se adiciona naranja de metilo e hidróxido de sodio en el que se adicionó fenolftaleína, hasta que se perciba un cambio de color en la muestra.

Seguido a esto, se debe registrar la cantidad (ml) gastados de los reactivos para hacer el cálculo respectivo

Ecuación 9. Alcalinidad

$$Alc = (ml\ de\ H_2SO_4 + ml\ de\ NaOH) * 10$$

Una vez determinada la alcalinidad, este valor debe multiplicarse por dos y el resultado es la cantidad óptima de coagulante, la cual también se puede determinar por medio del ensayo del test de jarras.

Figura 17. Reactivos utilizados en la determinación de la alcalinidad, a la izquierda; proceso de adición de reactivos, en el centro y derecha.



Fuente: Autores.

2.3. SOLUCIÓN COAGULANTE.

Para el proceso de las prácticas de laboratorio, se utilizó el coagulante recomendado por los autores del trabajo de grado *“Diseño y Construcción de una Planta Piloto Para el Tratamiento de Agua Potable en el Laboratorio de la Universidad Católica de Colombia”*; este es el sulfato de aluminio tipo A, $Al_2(SO_4)_3$.

Fue necesario para la utilización de este coagulante, preparar una solución de 2 litros de coagulante para cada turbiedad seleccionada, debido a su forma granular con la que se consigue en el mercado, lo anterior con el fin de que éste entrara en contacto con el agua ya disuelto, facilitando su mezcla y de esta manera garantizar la desestabilización de las partículas sólidas presentes en el agua.

Figura 18. Coagulante Sulfato de Aluminio Tipo A



Fuente: Autores.

2.4. FUNCIONAMIENTO PTAP.

Para poner en funcionamiento la planta de tratamiento se utilizó aproximadamente 500 litros de agua lluvia, para cada una de las tres turbiedades preparadas en cada uno de los caudales utilizados; previamente se le realizaron pruebas con el fin de medir los parámetros iniciales de ésta.

Una vez preparada la solución de coagulante, esta se colocó en la caída de agua después del vertedero, se encendió la planta junto con la bomba peristáltica y

pasados 30 minutos de esto, se inició con las tomas de las muestras de agua para obtener los datos de turbiedades.

Para la obtención de cada una de las turbiedades, fue necesario tomar muestras de agua tanto en la entrada de la planta y a la salida del sedimentador lamelar durante 60 minutos con intervalos de tiempo de 10 minutos cada uno, posteriormente a estas muestras se les midió la turbiedad con un turbidímetro HACH 47001.

Figura 19. Estructura de la planta de tratamiento, a la derecha; zona del vertedero y adición de la solución de coagulante, a la derecha.



Fuente: Autores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a los dos caudales que están planteados, se obtuvieron diferentes datos de turbiedad, para con ellos realizar los respectivos cálculos de eficiencia de remoción de partículas sólidas, el análisis y la comparación, de todos los resultados obtenidos, de esta manera, poder emitir un concepto respecto a conocimientos previos en cuanto al tema de la sedimentación.

Los caudales tomados para realizar las prácticas, fueron:

- $Q_1 = 0.1 \text{ lt/s}$
- $Q_2 = 0.05 \text{ lt/s}$

Para la preparación del agua problema se utilizó bentonita, con el fin de que el agua a tratar, alcance cada una de las turbiedades definidas anteriormente; también se tomaron los parámetros iniciales de cada agua problema utilizado.

La planta de tratamiento de agua potable cuenta con las siguientes dimensiones:

Tabla 2. Dimensiones de la planta piloto.

DATOS PLANTA		
Ángulo Lamela (θ):	60	°
Sedimentador L Largo	0,400	m
Sedimentador L Ancho	0,400	m
Área Útil Sedimentación:	0,16	m ²
Espaciamiento entre Lamelas (e):	0,06	m
Longitud lamela:	1,2	m
Coeficiente de forma (Sc):	1	NA

Fuente: Autores

3.1. TOMA DE MUESTRAS EN LA PTAP PILOTO

3.1.1. Turbiedad: 9.1 NTU – Caudal 0.1 lt/s.

En las siguientes tablas, se presentan los resultados obtenidos durante la práctica de laboratorio:

- Parámetros iniciales del agua.

Tabla 3. Parámetros Iniciales del Agua para el caudal 1 y la turbiedad de 9.1.

PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA		
Turbiedad inicial	9,1	NTU
Conductividad	122,2	μ s/cm
Resistividad	8,22	k * Ω * cm
Sólidos en suspensión	63,9	mg/lt
Salinidad	0,1	
Temperatura	17,2	°C
pH	7,963	
Alcalinidad	136	ml*lt/CaCO ₃
Caudal inicial	0,103	lt/s

Fuente: Autores.

- Turbiedades obtenidas, inicial y final durante 60 minutos.

Tabla 4. Datos de turbiedad (NTU) tomados en el intervalo de tiempo definido para el caudal 1 y NTU 9.1.

TURBIEDAD: 9,1 NTU		TEMPERATURA
<i>Tiempo 00:00 min</i>		(°C)
1	9,2	17,1
2	8	17,2
<i>Tiempo 10:00 min</i>		
1	9,2	17,1
2	7,7	17,2
<i>Tiempo 20:00 min</i>		
1	9	17,1

TURBIEDAD: 9,1 NTU		TEMPERATURA
2	6,8	17,2
<i>Tiempo 30:00 min</i>		
1	9,1	17,1
2	6	17,2
<i>Tiempo 40:00 min</i>		
1	8,8	17,1
2	5,4	17,2
<i>Tiempo 50:00 min</i>		
1	8,5	17,1
2	5,2	17,2
<i>Tiempo 60:00 min</i>		
1	8,3	17,1
2	5,2	17,2

Fuente: Autores.

3.1.2. Turbiedad: 11.3 NTU – Caudal 0.1 lt/s.

En las siguientes tablas, se presentan los resultados obtenidos durante la práctica de laboratorio:

- Parámetros iniciales del agua.

Tabla 5. Parámetros Iniciales del Agua para el caudal 1 y la turbiedad de 11.3.

PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA		
Turbiedad inicial	11,3	NTU
Conductividad	113	μ s/cm
Resistividad	8,86	k * Ω * cm
Sólidos en suspensión	60	mg/lt
Salinidad	0,1	
Temperatura	16,9	°C
pH	6,057	
Alcalinidad	118	ml*lt/CaCO ₃
Caudal inicial	0,1025	lt/s

Fuente: Autores.

- Turbiedades obtenidas, inicial y final durante 60 minutos.

Tabla 6. Datos de turbiedad (NTU) tomados en el intervalo de tiempo definido para el caudal 1 y NTU 11.3.

TURBIEDAD: 11,3 NTU		TEMPERATURA
	<i>Tiempo 00:00 min</i>	(°C)
1	12,5	16,9
2	5,3	16,7
<i>Tiempo 10:00 min</i>		
1	12	16,9
2	6,8	16,7
<i>Tiempo 20:00 min</i>		
1	12,5	16,9
2	9,23	16,7
<i>Tiempo 30:00 min</i>		
1	12,2	16,9
2	9,7	16,7
<i>Tiempo 40:00 min</i>		
1	11,4	16,9
2	6,35	16,7
<i>Tiempo 50:00 min</i>		
1	11,71	16,9
2	6,65	16,7
<i>Tiempo 60:00 min</i>		
1	11,9	16,9
2	5,75	16,7

Fuente: Autores.

3.1.3. Turbiedad: 14.5 NTU – Caudal 0.1 lt/s.

En las siguientes tablas, se presentan los resultados obtenidos durante la práctica de laboratorio:

Parámetros iniciales del agua.

Tabla 7. Parámetros Iniciales del Agua para el caudal 1 y la turbiedad de 14.5.

PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA		
Turbiedad inicial	14,5	NTU
Conductividad	113,3	μ s/cm
Resistividad	8,82	k * Ω * cm
Sólidos en suspensión	60,1	mg/l
Salinidad	0,1	
Temperatura	17	°C
pH	7,235	
Alcalinidad	150	ml*lt/CaCO3
Caudal inicial	0,1025	lt/s

Fuente: Autores.

- Turbiedades obtenidas, inicial y final durante 60 minutos.

Tabla 8. Datos de turbiedad (NTU) tomados en el intervalo de tiempo definido para el caudal 1 y NTU 14.5.

TURBIEDAD: 14,5 NTU		TEMPERATURA
	<i>Tiempo 00:00 min</i>	(°C)
1	14,6	17
2	3,33	16,9
<i>Tiempo 10:00 min</i>		
1	14,5	17
2	9,3	16,9
<i>Tiempo 20:00 min</i>		
1	14,4	17
2	8,1	16,9
<i>Tiempo 30:00 min</i>		
1	14,4	17
2	8,03	16,9
<i>Tiempo 40:00 min</i>		
1	14,2	17
2	9,6	16,9

TURBIEDAD: 14,5 NTU		TEMPERATURA
<i>Tiempo 50:00 min</i>		
1	14,7	17
2	8,95	16,9
<i>Tiempo 60:00 min</i>		
1	14,8	17
2	9,7	16,9

Fuente: Autores.

- Empleando la ecuación 8 se obtuvieron las siguientes eficiencias para el caudal 1 y NTU 14.5.

Tabla 9. Eficiencias de remoción Q1, NTU 14.5.

TURBIEDAD: 14.5 NTU		
	<i>Tiempo (min)</i>	% EFICIENCIA
1	00:00	77,19
2	10:00	35,86
3	20:00	43,75
4	30:00	44,24
6	40:00	32,39
7	50:00	39,12
8	60:00	34,46

Fuente: Autores.

3.1.4. Turbiedad: 9.1 NTU – Caudal 0.05 lt/s.

En las siguientes tablas, se presentan los resultados obtenidos durante la práctica de laboratorio:

- Parámetros iniciales del agua.

Tabla 10. Parámetros Iniciales del Agua para el caudal 2 y la turbiedad de 9.21.

PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA		
Turbiedad inicial	9,21	NTU
Conductividad	114,4	μ s/cm
Resistividad	8,71	k * Ω * cm
Sólidos en suspensión	60,8	mg/lt

PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA		
Salinidad	0,1	
Temperatura	17,2	°C
pH	7,335	
Alcalinidad	134	ml*lt/CaCO3
Caudal inicial	0,0586	lt/s

Fuente: Autores.

- Turbiedades obtenidas, inicial y final durante 60 minutos.

Tabla 11. Datos de turbiedad (NTU) tomados en el intervalo de tiempo definido para el caudal 2 y NTU 9.21.

TURBIEDAD: 9.21 NTU		TEMPERATURA
	<i>Tiempo 00:00 min</i>	(°C)
1	8,8	17,2
2	1,35	17,1
<i>Tiempo 10:00 min</i>		
1	8,68	17,2
2	2,32	17,1
<i>Tiempo 20:00 min</i>		
1	9	17,2
2	2,55	17,1
<i>Tiempo 30:00 min</i>		
1	8,87	17,2
2	2,7	17,1
<i>Tiempo 40:00 min</i>		
1	9,5	17,2
2	3,7	17,1
<i>Tiempo 50:00 min</i>		
1	9,3	17,2
2	6,6	17,1
<i>Tiempo 60:00 min</i>		
1	9,2	17,2
2	7,5	17,1

Fuente: Autores.

3.1.5. Turbiedad: 11.6 NTU – Caudal 0.05 lt/s.

En las siguientes tablas, se presentan los resultados obtenidos durante la práctica de laboratorio:

- Parámetros iniciales del agua.

Tabla 12. Parámetros Iniciales del Agua para el caudal 2 y la turbiedad de 11.6.

PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA		
Turbiedad inicial	11,6	NTU
Conductividad	117,5	μ s/cm
Resistividad	8,57	k * Ω * cm
Sólidos en suspensión	62,2	mg/lt
Salinidad	0,1	
Temperatura	17	°C
pH	7,545	
Alcalinidad	132	ml*lt/CaCO ₃
Caudal inicial	0,0586	lt/s

Fuente: Autores.

- Turbiedades obtenidas, inicial y final durante 60 minutos.

Tabla 13. Datos de turbiedad (NTU) tomados en el intervalo de tiempo definido para el caudal 2 y NTU 11.6.

TURBIEDAD: 11.6 NTU		TEMPERATURA
	<i>Tiempo 00:00 min</i>	(°C)
1	10,8	17
2	3,8	17,1
<i>Tiempo 10:00 min</i>		
1	11	17
2	3,2	17,1
<i>Tiempo 20:00 min</i>		
1	10,6	17
2	3,34	17,1
<i>Tiempo 30:00 min</i>		
1	11,2	17
2	3,8	17,1

TURBIEDAD: 11.6 NTU		TEMPERATURA
<i>Tiempo 40:00 min</i>		
1	11,4	17
2	5,6	17,1
<i>Tiempo 50:00 min</i>		
1	11,5	17
2	6	17,1
<i>Tiempo 60:00 min</i>		
1	11,6	17
2	6	17,1

Fuente: Autores.

3.1.6. Turbiedad: 15 NTU – Caudal 0.05 lt/s.

En las siguientes tablas, se presentan los resultados obtenidos durante la práctica de laboratorio:

- Parámetros iniciales del agua.

Tabla 14. Parámetros Iniciales del Agua para el caudal 2 y la turbiedad de 15.

PARÁMETROS INICIALES DEL AGUA		
Turbiedad inicial	15	NTU
Conductividad	112,1	μ s/cm
Resistividad	8,9	k * Ω * cm
Sólidos en suspensión	59,8	mg/lt
Salinidad	0,1	
Temperatura	17,3	°C
pH	7,515	
Alcalinidad	160	ml*lt/CaCO3
Caudal inicial	0,0586	lt/s

Fuente: Autores.

Turbiedades obtenidas, inicial y final durante 60 minutos.

Tabla 15. Datos de turbiedad (NTU) tomados en el intervalo de tiempo definido para el caudal 2 y NTU 15.

TURBIEDAD: 15 NTU		TEMPERATURA
	<i>Tiempo 00:00 min</i>	(°C)
1	14,7	17,3
2	3,88	17,4
<i>Tiempo 10:00 min</i>		
1	14	17,3
2	6,5	17,4
<i>Tiempo 20:00 min</i>		
1	13,6	17,3
2	6,9	17,4
<i>Tiempo 30:00 min</i>		
1	13,7	17,3
2	6,63	17,4
<i>Tiempo 40:00 min</i>		
1	13,3	17,3
2	7,26	17,4
<i>Tiempo 50:00 min</i>		
1	13,1	17,3
2	6,9	17,4
<i>Tiempo 60:00 min</i>		
1	12,5	17,3
2	6,86	17,4

Fuente: Autores.

3.2. CÁLCULOS PARA EL CAUDAL 1 (Q1)

3.2.1. Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 9.1 NTU

3.2.1.1. Cálculos Iniciales de la PTAP

En la siguiente tabla, se presentan los resultados correspondientes a las velocidades ascensional y crítica de sedimentación en los cuales se utilizaron las ecuaciones 1 y 5 respectivamente; las longitudes, relativa, crítica y de placas se calcularon con las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente y para la carga superficial y el tiempo de concentración se utilizaron las ecuaciones 7 y 6 respectivamente.

Tabla 16 Cálculos iniciales de la PTAP

CALCULOS INICIALES DE LA PTAP		
Caudal (m ³ /min):	0,00620	m ³ /min
Velocidad inicial de sedimentación (V ₀):	0,04473	m/min
Longitud de Placas (L):	20	m
Longitud relativa (L'):	0,5369	m
Longitud Crítica (L _c):	19,463	m
Velocidad de sedimentación crítica (V _{sc}):	0,0042	m/min
Carga Superficial (Cs):	0,06710	
Tiempo t (min):	26,828	min
Volumen (Vol):	0,166	m ³
Longitud de Lamelas (h)	1,2	m
Viscosidad cinemática a 17,2°C	0,00006498	m ² /min

Fuente: Autores.

3.2.1.2. Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar.

De acuerdo a los datos de turbiedad tomados en la práctica de laboratorio, se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción para cada intervalo de tiempo para los caudales y turbiedades empleados, con la siguiente ecuación:

Ecuación 10. Porcentaje de eficiencia de remoción de partículas.

$$Ef = \frac{NTU_o - NTU_F}{NTU_o}$$

Empleando la anterior ecuación se obtuvieron las siguientes eficiencias para el caudal 1 y NTU 9.1

Tabla 17. Eficiencias de remoción Q₁, NTU 9.1.

TURBIEDAD: 9,1 NTU		
<i>Tiempo (min)</i>		% EFICIENCIA
1	00:00	13,04
2	10:00	16,30
3	20:00	24,44
4	30:00	34,07
6	40:00	38,64
7	50:00	38,82
8	60:00	37,35

Fuente: Autores.

3.2.1.3. Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa

Para determinar las eficiencias de eliminación según Evans M.N. Chirwa, éstas se calcularon con la siguiente ecuación:

Ecuación 11. Porcentaje de eficiencia de eliminación

$$P = \left(\frac{-D}{r_1 * t^{r_2} - r_3 * t} \right)^{0,5}$$

Donde D corresponde a la longitud de lamelas y t corresponde al tiempo de retención; los parámetros de r_1 , r_2 y r_3 , se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 3.

Tabla 18. Eficiencias de remoción Q₁, NTU 9.1.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS EXPERIMENTALES	
1	33,397
2	42,089
3	33,918
4	43,526
5	62,177

Fuente: Autores.

Evans M.N. Chirwa tomó datos de otros autores con el fin de determinar cuál de los parámetros (experimentales o literatura) presentan mejor eficiencia de remoción. Los datos de los otros autores se encuentran en la tabla 4. Se realizó el cálculo de las eficiencias de remoción con la Ecuación No. 10

Tabla 19. Eficiencias de remoción Q_1 , NTU 9.1.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS DE LITERATURA	
74,006	Je et al
55,271	Reynolds y Richards
26,789	Berthouex & Stevens
75,246	Eckenfelder

Fuente: Autores.

3.2.1.4. Cálculo de eficiencia de Adem Özer

Para determinar el porcentaje de remoción según Adem Özer se calculó con la siguiente ecuación:

Ecuación 12. Porcentaje de eficiencia de eliminación

$$(P = aH^bT^d)$$

Donde H corresponde a la longitud de lamelas y T corresponde al tiempo de retención; los parámetros de a, b y d, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 6.

Tabla 20. Porcentaje de Remoción Q_1 , NTU 9.1.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	49,058	Weber (1972)
2	25,285	Berthouex (1982)
3	44,024	O'Connor (1961)
4	80,528	Zanoni (1975)
5	40,399	Campo (1946)
6	39,251	Huisman (1972)
7	88,778	Huisman (1972)
8	51,124	O'Connor (1961)
9	62,925	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

Además, este autor realiza una predicción de la eficiencia de eliminación, la cual se realiza con la siguiente ecuación:

Ecuación 13. Predicción de la eficiencia de eliminación

$$R_o = \frac{a H^b T^d}{b + 1}$$

Donde H corresponde a la longitud de lamelas y T corresponde al tiempo de retención; los parámetros de a, b y d, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 6.

Tabla 21. Predicción de la eficiencia de eliminación Q₁, NTU 9.1.

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
1	60,469	Weber (1972)
2	79,772	Berthouex (1982)
3	61,551	o'Connor (1961)
4	29,915	Zanoni (1975)
5	73,699	Campo (1946)
6	74,66	Huisman (1972)
7	68,384	Huisman (1972)
8	64,299	o'Connor (1961)
9	56,901	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

3.2.1.5. Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San

Para determinar el porcentaje de remoción según Hasan Ali San se calculó con la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Porcentaje de eficiencia de eliminación

$$P = \frac{T^b}{a H^k + T^b}$$

Donde H corresponde a la longitud de lamelas y T corresponde al tiempo de retención; los parámetros de a, b y k, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 2.

Tabla 22. Porcentaje de remoción Q_1 , NTU 9.1.

PORCENTAJE DE REMOCION		
1	59,565	Eckenfelder (1966) ^A
2	97,873	Eckenfelder (1966) ^B
3	97,966	O'Connor (1961) ^A and
4	84,91	Eckenfelder (1961) ^{AB}
5	98,417	Reynolds, T. D. (1982) ^A
6	97,361	Reynolds, T. D. (1982) ^B
7	96,471	Camp, T. R. (1946) ^A
8	77,667	San (1980)"
9	59,69	Zanoni, A. E. (1975) ^A
10	92,581	Berthouex (1982) ^A
11	99,97	Camp, T. R. (1946) ^B
12	100	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

3.2.1.6. Cálculo de eficiencia de P. Piro

Para determinar las eficiencias según el artículo de P. Piro, se tomaron las turbiedades finales en el sedimentador lamelar. La velocidad se calculó dividiendo la altura de la lamela entre el tiempo, una vez obtenida se multiplicó por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

El remanente de turbiedad (X_o) se determinó, dividiendo la turbiedad final en el sedimentador entre y la turbiedad inicial, que para este caso es 9.1NTU.

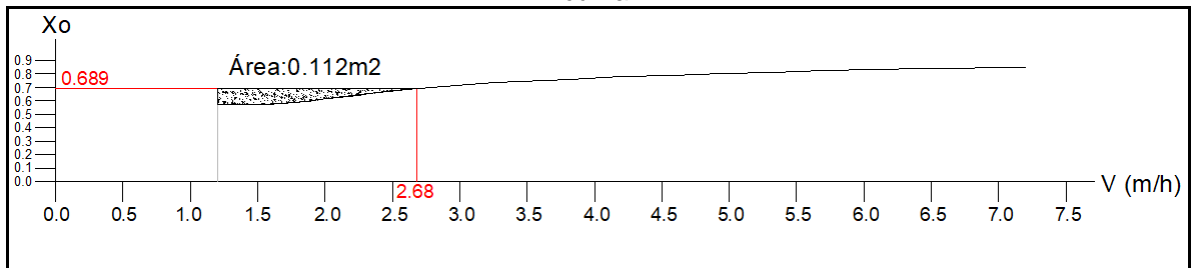
Tabla 23. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_1 , NTU 9.1.

To (min)	NTUf	V (m/h)	Xo	(1 - Xo)
0	8			
10	7,7	7,2	0,85	0,15
20	6,8	3,6	0,75	0,25
30	6	2,4	0,66	0,34
40	5,4	1,8	0,59	0,41
50	5,2	1,44	0,57	0,43
60	5,2	1,2	0,57	0,43

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos anteriormente, se realizó grafica de V vs Xo, esto con el fin de determinar el área bajo la curva. El punto de corte se determino con la velocidad ascensional multiplicada por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

Gráfica 1 Área bajo la curva



Fuente: Autores.

Para calcular la eficiencia se utilizó la ecuación:

Ecuación 15. Eficiencia

$$E_f = (1 - X_o) + \int \frac{Vs}{V_{sc}} * dx$$

Donde $(1 - X_o) = 1 - 0.689 = 0.311$

$$y \int \frac{Vs}{V_{sc}} = \frac{0.112m^2}{\frac{2.68m}{h}} = 0.0418m/h$$

Por lo tanto, la eficiencia en este caso es igual a 35.28%

3.2.1.7. Cálculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación

Con la curva de isoconcentración de turbiedad de 9.1NTU, correspondiente al trabajo de grado: *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”* se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia, utilizando la siguiente ecuación:

Ecuación 16. Eficiencia

$$E_f = \sum \frac{\Delta hn}{hT} x \overline{E_f} ,$$

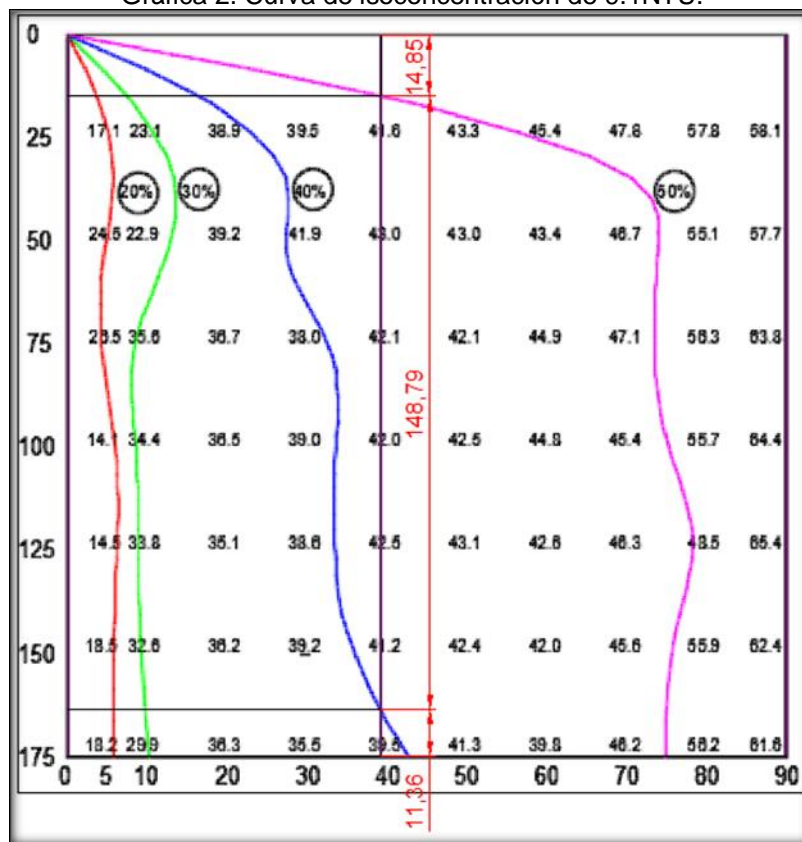
El tiempo se obtiene a partir de la velocidad ascensional, por medio de la siguiente ecuación:

Ecuación 17. Eficiencia

$$T = \frac{h}{V_o}$$

Es utilizado como línea de corte en la gráfica, a continuación, se representa de manera gráfica el procedimiento realizado.

Gráfica 2. Curva de isoconcentración de 9.1NTU.



Fuente: Autores.

Con las dimensiones que se encuentran en la curva de isoconcentración, se realizó el cálculo de Porcentaje de Eficiencia, teniendo en cuenta la ecuación 16:

Tabla 24. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_1 , NTU 9.1.

Alturas en la gráfica:	h1=	14,85	cm
	h2=	148,79	cm
	h3=	11,36	cm
Porcentajes de remoción:	100		%
	50		%
	40		%
	30		%
Eficiencia	46.897		%

Fuente: Autores.

3.2.2. Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 11.3 NTU

3.2.2.1. Cálculos Iniciales de la PTAP

En la siguiente tabla, se presentan los resultados correspondientes a las velocidades ascensional y crítica de sedimentación en los cuales se utilizaron las ecuaciones 1 y 5 respectivamente; las longitudes, relativa, crítica y de placas se calcularon con las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente y para la carga superficial y el tiempo de concentración se utilizaron las ecuaciones 7 y 6 respectivamente.

Tabla 25 Cálculos iniciales de la PTAP

CALCULOS INICIALES DE LA PTAP		
Caudal (m^3/min):	0,0062	m^3/min
Velocidad inicial de sedimentación (V_0):	0,044	m/min
Longitud de Placas (L):	20	m
Longitud relativa (L'):	0,53	m
Longitud Crítica (L_c):	19,47	m
Velocidad de sedimentación crítica (V_{sc}):	0,0042	m/min
Carga Superficial (C_s):	0,06710	
Tiempo t (min):	27,037	min
Volumen (Vol):	0,1663	m^3
Longitud de Lamelas (h)	1,2	m
Viscosidad cinemática a 16,8°C	0,0000657	m^2/min

Fuente: Autores.

3.2.2.2. Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar.

De acuerdo a los datos de turbiedad tomados en la práctica de laboratorio, se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción para cada intervalo de tiempo para los caudales y turbiedades empleados.

Empleando la ecuación 10 se obtuvieron las siguientes eficiencias para el caudal 1 y NTU 11.3

Tabla 26. Eficiencias de remoción Q1, NTU 11.3.

TURBIEDAD: 11.3 NTU		
	<i>Tiempo (min)</i>	% EFICIENCIA
1	00:00	57.60
2	10:00	43.33
3	20:00	26,16
4	30:00	20,49
6	40:00	44,30
7	50:00	43,21
8	60:00	51,68

Fuente: Autores.

3.2.2.3. Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa

Para determinar las eficiencias de eliminación según Evans M.N. Chirwa, éstas se calcularon con la ecuación 11.

Tabla 27. Eficiencias de remoción Q₁, NTU 11.3.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS EXPERIMENTALES	
1	33,121
2	41,749
3	33,629
4	43,181
5	61,645

Fuente: Autores.

Evans M.N. Chirwa tomó datos de otros autores con el fin de determinar cuál de los parámetros (experimentales o literatura) presentan mejor eficiencia de remoción. Los datos de los otros autores se encuentran en la tabla 4. Se realizó el cálculo de las eficiencias de remoción con la Ecuación No. 10

Tabla 28. Eficiencias de remoción Q_1 , NTU 11.3.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS DE LITERATURA	
73,694	Je et al
55,010	Reynolds y Richards
26,667	Berthouex & Stevens
74,954	Eckenfelder

Fuente: Autores.

3.2.2.4. Cálculo de eficiencia de Adem Özer

Para determinar el porcentaje de remoción según Adem Özer se calculó con la ecuación 12 y los parámetros a, b y d se obtuvieron de la tabla No. 6.

Tabla 29. Porcentaje de Remoción Q_1 , NTU 11.3.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	48,884	Weber (1972)
2	25,161	Berthouex (1982)
3	43,851	O'Connor (1961)
4	80,248	Zanoni (1975)
5	39,964	Campo (1946)
6	38,875	Huisman (1972)
7	87,654	Huisman (1972)
8	50,979	O'Connor (1961)
9	62,716	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

Además, este autor realiza una predicción de la eficiencia de eliminación, la cual se realiza con la ecuación 13 y los parámetros a, b y d se obtuvieron de la tabla No. 6.

Tabla 30. Predicción de la eficiencia de eliminación Q_1 , NTU 11.3.

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
1	60,609	Weber (1972)
2	79,872	Berthouex (1982)
3	61,702	o'Connor (1961)
4	30,158	Zanoni (1975)
5	73,982	Campo (1946)
6	74,903	Huisman (1972)
7	68,784	Huisman (1972)
8	64,4	o'Connor (1961)
9	57,044	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

3.2.2.5. Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San

Para determinar el porcentaje de remoción según Hasan Ali San se calculó con la ecuación 14 y los parámetros de a, b y k, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 2

Tabla 31. Porcentaje de remoción Q_1 , NTU 11.3.

PORCENTAJE DE REMOCION		
1	59,660	Eckenfelder (1966)A
2	97,888	Eckenfelder (1966)B
3	97,979	O'Connor (1961)A and
4	85,017	Eckenfelder (1961)AB
5	98,432	Reynolds, T. D. (1982)A
6	97,381	Reynolds, T. D. (1982)B
7	96,524	Camp, T. R. (1946)A
8	77,844	San (1980)"
9	59,916	Zanoni, A. E. (1975)A
10	92,626	Berthouex (1982)A
11	99,971	Camp, T. R. (1946)B
12	99,999	Huisman, L. (1972)B

Fuente: Autores.

3.2.2.6. Cálculo de eficiencia de P. Piro

Para determinar las eficiencias según el artículo de P. Piro, se tomaron las turbiedades finales en el sedimentador lamelar. La velocidad se calculó dividiendo la altura de la lamela entre el tiempo, una vez obtenida se multiplicó por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

El remanente de turbiedad (X_o) se determinó, dividiendo la turbiedad final en el sedimentador entre y la turbiedad inicial, que para este caso es 11.3NTU.

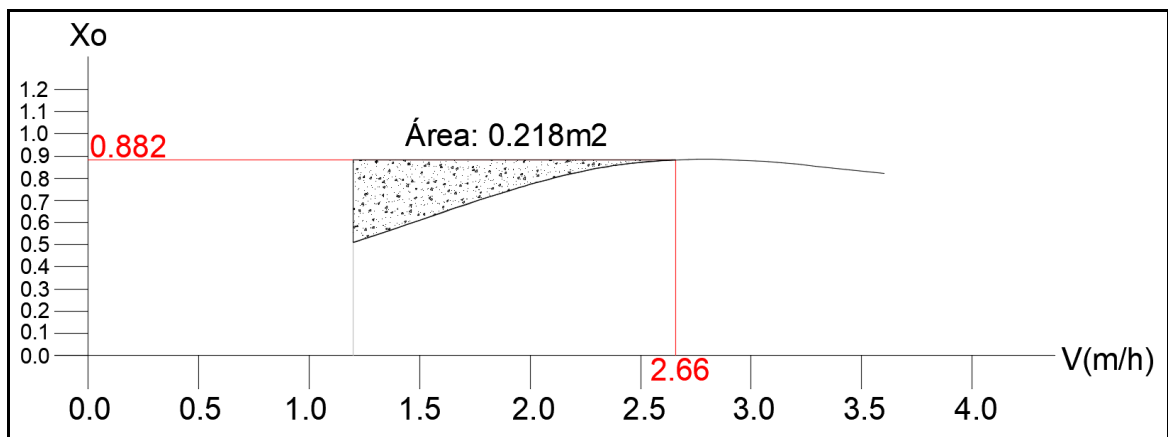
Tabla 32. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_1 , NTU 11.3.

To (min)	NTUf	V (m/h)	Xo	(1 - Xo)
0	5,3			
10	6,8	7,2	0,60	0,40
20	9,23	3,6	0,82	0,18
30	9,7	2,4	0,86	0,14
40	6,35	1,8	0,56	0,44
50	6,65	1,44	0,59	0,41
60	5,75	1,2	0,51	0,49

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos anteriormente, se realizó grafica de V vs X_o , esto con el fin de determinar el área bajo la curva. El punto de corte se determino con la velocidad ascensional multiplicada por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

Gráfica 3 Área sobre la curva



Fuente: Autores.

Para calcular la eficiencia se utilizó la ecuación 15

Se calculó: donde

$$(1 - X_o) = 1 - 0.882 = 0.118$$

$$y \int \frac{V_s}{V_{sc}} = \frac{0.218}{\frac{2.65m}{h}} = 0.0820m/h$$

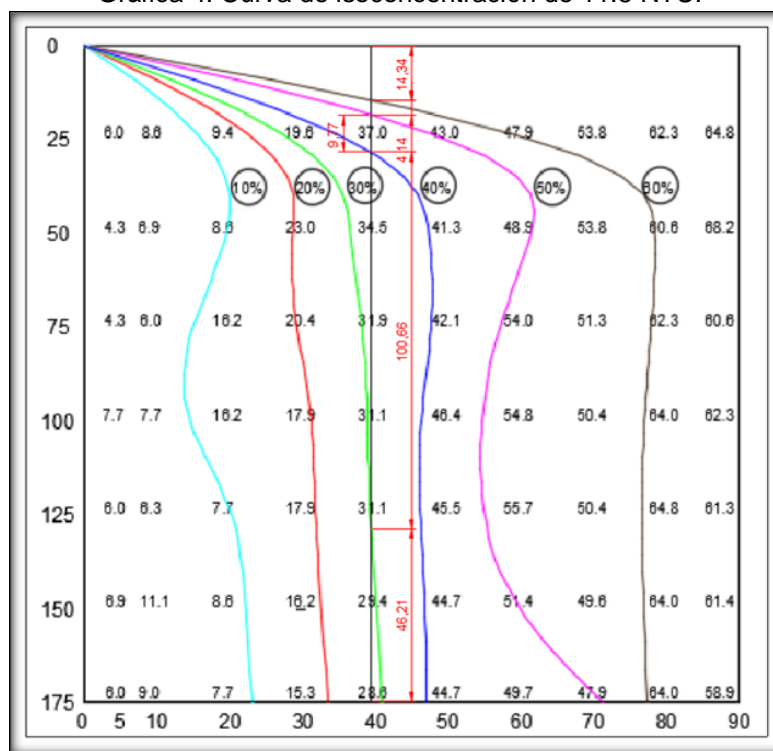
Por lo tanto, la eficiencia en este caso es igual a 20.0%

3.2.2.7. Cálculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación

Con la curva de isoconcentración de turbiedad de 11.8NTU, correspondiente al trabajo de grado: *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”* se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia, utilizando la ecuación 16.

El tiempo se obtiene a partir de la velocidad ascensional, por medio de la siguiente ecuación 17, es utilizado como línea de corte en la gráfica, a continuación, se representa de manera gráfica el procedimiento realizado.

Gráfica 4. Curva de isoconcentración de 11.8 NTU.



Fuente: Autores.

Con las dimensiones que se encuentran en la curva de isoconcentración, se realizó el cálculo de Porcentaje de Eficiencia, teniendo en cuenta la ecuación 16:

Tabla 33. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_1 , NTU 11.3.

Alturas en la gráfica:	h1=	14,24	cm
	h2=	4,12	cm
	h3=	9,77	cm
	h4=	100,66	cm
	h5=	46,21	cm
Porcentajes de remoción:	100		%
	60		%
	50		%
	40		%
	30		%
	20		%
Eficiencia:	37,050		%

Fuente: Autores.

3.2.3. Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 14.5 NTU

3.2.3.1. Cálculos Iniciales de la PTAP

En la siguiente tabla, se presentan los resultados correspondientes a las velocidades ascensional y crítica de sedimentación en los cuales se utilizaron las ecuaciones 1 y 5 respectivamente; las longitudes, relativa, crítica y de placas se calcularon con las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente y para la carga superficial y el tiempo de concentración se utilizaron las ecuaciones 7 y 6 respectivamente.

Tabla 34 Cálculos iniciales de la PTAP

CALCULOS INICIALES DE LA PTAP		
Caudal (m^3/min):	0,0062	m^3/min
Velocidad inicial de sedimentación (V_0):	0,044	m/min
Longitud de Placas (L):	20	m
Longitud relativa (L'):	0,53	m
Longitud Crítica (L_c):	19,47	m
Velocidad de sedimentación crítica (V_{sc}):	0,0042	m/min
Carga Superficial (C_s):	0,06710	
Tiempo t (min):	27,037	min
Volumen (Vol):	0,1663	m^3
Longitud de Lamelas (h)	1,2	m
Viscosidad cinemática a 17°C	0.00006534	m^2/min

Fuente: Autores.

3.2.3.2. Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar.

De acuerdo a los datos de turbiedad tomados en la práctica de laboratorio, se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción para cada intervalo de tiempo para los caudales y turbiedades empleados.

Empleando la ecuación 10 se obtuvieron las siguientes eficiencias para el caudal 1 y NTU 14.5.

Tabla 35. Eficiencias de remoción Q_1 , NTU 14.5.

TURBIEDAD: 14.5 NTU		
	<i>Tiempo (min)</i>	% EFICIENCIA
1	00:00	77,19
2	10:00	35,86
3	20:00	43,75
4	30:00	44,24
6	40:00	32,39
7	50:00	39,12
8	60:00	34,46

Fuente: Autores.

3.2.3.3. Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa

Para determinar las eficiencias de eliminación según Evans M.N. Chirwa, éstas se calcularon con la ecuación 11.

Tabla 36. Eficiencias de remoción Q_1 , NTU 14.5.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS EXPERIMENTALES	
1	33.121
2	41.749
3	33.629
4	43.181
5	61.645

Fuente: Autores.

Evans M.N. Chirwa tomó datos de otros autores con el fin de determinar cuál de los parámetros (experimentales o literatura) presentan mejor eficiencia de remoción. Los datos de los otros autores se encuentran en la tabla 4. Se realizó el cálculo de las eficiencias de remoción con la Ecuación No. 10

Tabla 37. Eficiencias de remoción Q_1 , NTU 14.5.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS DE LITERATURA	
73.694	Je et al
55.010	Reynolds y Richards
26.667	Berthouex & Stevens
74.954	Eckenfelder

Fuente: Autores.

3.2.3.4. Cálculo de eficiencia de Adem Özer

Para determinar el porcentaje de remoción según Adem Özer se calculó con la ecuación 12 y los parámetros a, b y d se obtuvieron de la tabla No. 6.

Tabla 38. Porcentaje de Remoción Q_1 , NTU 14.5.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	48.88	Weber (1972)
2	25.16	Berthouex (1982)
3	43.85	O'Connor (1961)
4	80.25	Zanoni (1975)
5	39.96	Campo (1946)
6	38.88	Huisman (1972)
7	87.65	Huisman (1972)
8	50.98	O'Connor (1961)
9	62.72	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

Además, este autor realiza una predicción de la eficiencia de eliminación, la cual se realizó con la ecuación 13, los parámetros de a, b y d, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 6.

Tabla 39. Predicción de la eficiencia de eliminación Q_1 , NTU 14.5.

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
1	60.61	Weber (1972)
2	79.87	Berthouex (1982)
3	61.70	o'Connor (1961)
4	30.16	Zanoni (1975)
5	73.98	Campo (1946)
6	74.90	Huisman (1972)
7	68.78	Huisman (1972)
8	64.40	o'Connor (1961)
9	57.04	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

3.2.3.5. Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San

Para determinar el porcentaje de remoción según Hasan Ali San se calculó con la ecuación 14, y los parámetros a, b y k, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 2.

Tabla 40. Porcentaje de remoción Q_1 , NTU 14.5.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	59.66	Eckenfelder (1966) ^A
2	97.89	Eckenfelder (1966) ^B
3	97.98	O'Connor (1961) ^A and
4	85.02	Eckenfelder (1961) ^{AB}
5	98.43	Reynolds, T. D. (1982) ^A
6	97.38	Reynolds, T. D. (1982) ^B
7	96.52	Camp, T. R. (1946) ^A
8	77.84	San (1980)"
9	59.92	Zanoni, A. E. (1975) ^A
10	92.63	Berthouex (1982) ^A
11	99.97	Camp, T. R. (1946) ^B
12	100.00	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

3.2.3.6. Cálculo de eficiencia de P. Piro

Para determinar las eficiencias según el artículo de P. Piro, se tomaron las turbiedades finales en el sedimentador lamelar. La velocidad se calculó dividiendo la altura de la lamela entre el tiempo, una vez obtenida se multiplicó por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

El remanente de turbiedad (X_o), se determinó dividiendo la turbiedad final en el sedimentador entre la turbiedad inicial, que para este caso es 14.5 NTU.

Tabla 41. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_1 , NTU 14.5.

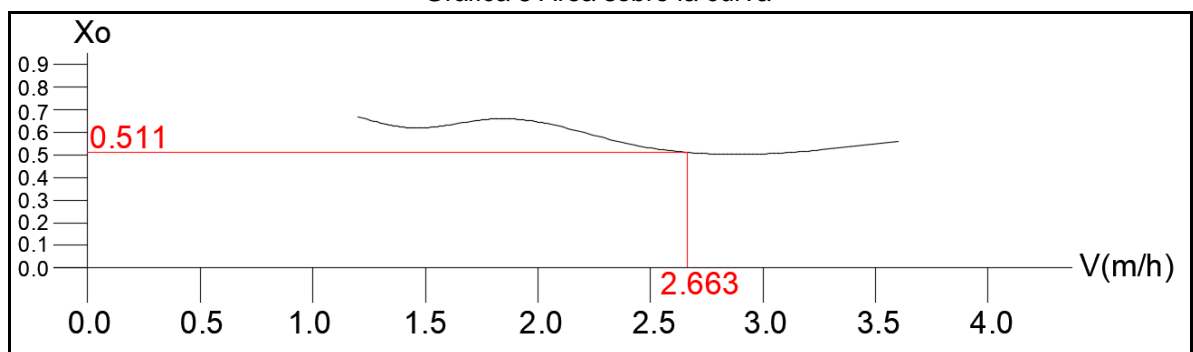
To (min)	NTU _f	V (m/h)	X _o	(1 - X _o)
0	3.33			
10	9.3	7.2	0.64	0.36
20	8.1	3.6	0.56	0.44
30	8.03	2.4	0.55	0.45
40	9.6	1.8	0.66	0.34
50	8.95	1.44	0.62	0.38

To (min)	NTU _f	V (m/h)	Xo	(1 - Xo)
0	3.33			
60	9.7	1.2	0.67	0.33

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos anteriormente, se realizó grafica de V vs Xo, esto con el fin de determinar el área bajo la curva. El punto de corte se determino con la velocidad ascensional multiplicada por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

Gráfica 5 Área sobre la curva



Fuente: Autores.

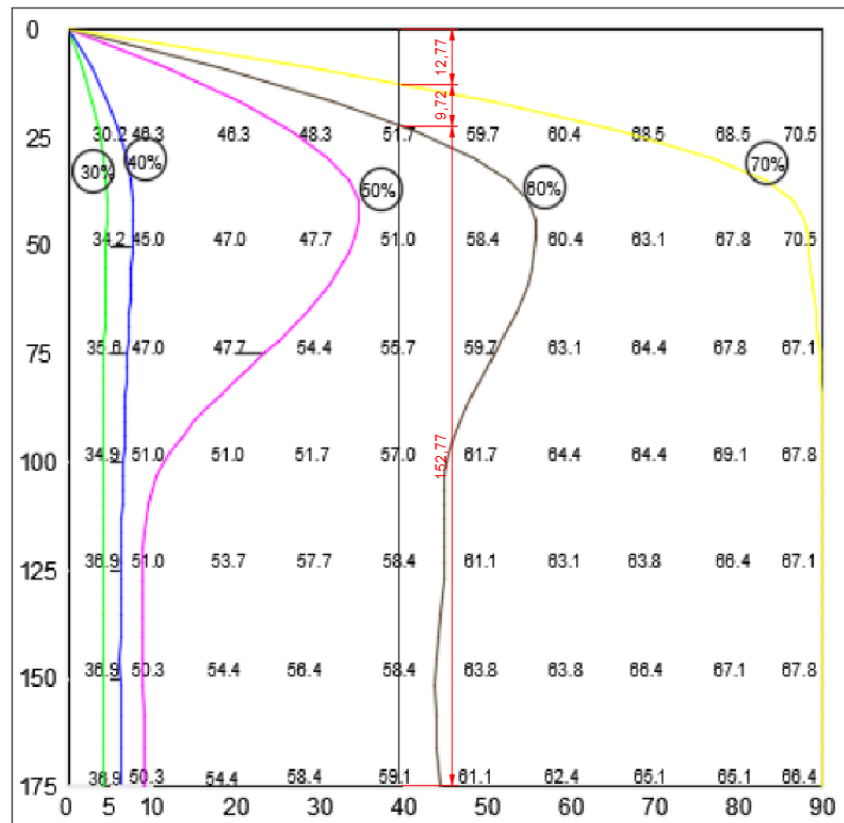
No fue posible calcular al área sobre la curva, puesto que el punto de corte en la gráfica al ser proyectado perpendicularmente hacia el eje y, se encuentra bajo la curva, por lo tanto, no se puede determinar la eficiencia de remoción para este caudal.

3.2.3.7. Cálculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación

Con la curva de isoconcentración de turbiedad de 14.9 NTU, correspondiente al trabajo de grado: *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”* se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia, utilizando la ecuación 16, el tiempo se obtiene a partir de la velocidad ascensional, por medio de la ecuación 17.

Este tiempo es utilizado como línea de corte en la gráfica, a continuación, se representa de manera gráfica el procedimiento realizado.

Gráfica 6. Curva de isoconcentración de 14.9 NTU.



Fuente: Autores.

Con las dimensiones que se encuentran en la curva de isoconcentración, se realizó el cálculo de Porcentaje de Eficiencia, teniendo en cuenta la ecuación 16:

Tabla 42. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_1 , NTU 14.9.

Alturas en la gráfica:	h1=	12.77	cm
	h2=	9.72	cm
	h3=	152.51	cm
Porcentajes de remoción:	100		%
	70		%
	60		%
	50		%
Eficiencia:	57.745		%

Fuente: Autores.

3.3. CÁLCULOS PARA EL CAUDAL 2 ($Q_2 = 0.05$ l/s)

3.3.1. Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 9.21 NTU.

3.3.1.1. Cálculos Iniciales de la PTAP

En la siguiente tabla, se presentan los resultados correspondientes a las velocidades ascensional y crítica de sedimentación en los cuales se utilizaron las ecuaciones 1 y 5 respectivamente; las longitudes, relativa, crítica y de placas, se calcularon con las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente y para la carga superficial y el tiempo de concentración se utilizaron las ecuaciones 7 y 6 respectivamente.

Tabla 43. Cálculos iniciales de la PTAP.

CÁLCULOS INICIALES DE LA PTAP		
Caudal (m^3/min):	0.0035	m^3/min
Velocidad inicial de sedimentación (V_0):	0.02538	m/min
Longitud de Placas (L):	20	m
Longitud relativa (L'):	0,3046	m
Longitud Crítica (L_c):	19,695	m
Velocidad de sedimentación crítica (V_{sc}):	0,0015	m/min
Carga Superficial (C_s):	0,0381	
Tiempo t (min):	47.283	min
Volumen (Vol):	0,166	m^3
Longitud de Lamelas (h)	1,2	m
Viscosidad cinemática a 17,2°C	0,00006498	m^2/min

Fuente: Autores.

3.3.1.2. Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar.

De acuerdo a los datos de turbiedad tomados en la práctica de laboratorio, se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción para cada intervalo de tiempo para los caudales y turbiedades empleados.

Empleando la ecuación 10 se obtuvieron las siguientes eficiencias para el caudal 2 y NTU 9.21.

Tabla 44. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 9.21.

TURBIEDAD: 9,21 NTU		
<i>Tiempo (min)</i>		% EFICIENCIA
1	00:00	84.66
2	10:00	73.27
3	20:00	71.67
4	30:00	69.56
6	40:00	61.05
7	50:00	29.03
8	60:00	18.48

Fuente: Autores.

3.3.1.3. Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa.

Para determinar las eficiencias de eliminación según Evans M.N. Chirwa, éstas se calcularon con la ecuación 11.

Tabla 45. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 9.21.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS EXPERIMENTALES	
1	18.207
2	23.279
3	18.187
4	24.366
5	32.737

Fuente: Autores.

Evans M.N. Chirwa tomó datos de otros autores con el fin de determinar cuál de los parámetros (experimentales o literatura) presentan mejor eficiencia de remoción. Los datos de los otros autores se encuentran en la tabla 4. Se realizó el cálculo de las eficiencias de remoción con la Ecuación No. 10

Tabla 46. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 9.21.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS DE LITERATURA	
54.217	Je et al
38.519	Reynolds y Richards
18.856	Berthouex & Stevens
56.678	Eckenfelder

Fuente: Autores.

3.3.1.4. Cálculo de eficiencia de Adem Özer

Para determinar el porcentaje de remoción según Adem Özer se calculó con la ecuación 12 y los parámetros a, b y d se obtuvieron de la tabla No. 6.

Tabla 47. Porcentaje de Remoción Q_2 , NTU 9.21.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	37.86	Weber (1972)
2	17.66	Berthouex (1982)
3	33.05	O'Connor (1961)
4	62.47	Zanoni (1975)
5	18.37	Campo (1946)
6	19.45	Huisman (1972)
7	35.05	Huisman (1972)
8	41.55	O'Connor (1961)
9	49.37	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

Además, este autor realiza una predicción de la eficiencia de eliminación, la cual se realizó con la ecuación 13, los parámetros de a, b y d, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 6.

Tabla 48. Predicción de la eficiencia de eliminación Q_2 , NTU 9.1.

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
1	69.49	Weber (1972)
2	85.87	Berthouex (1982)
3	71.14	O'Connor (1961)
4	45.63	Zanoni (1975)
5	88.04	Campo (1946)

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
6	87.44	Huisman (1972)
7	87.52	Huisman (1972)
8	70.99	o'Connor (1961)
9	66.18	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

3.3.1.5. Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San

Para determinar el porcentaje de remoción según Hasan Ali San se calculó con la ecuación 14, y los parámetros a, b y k, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 2.

Tabla 49. Porcentaje de remoción Q₂, NTU 9.21.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	66.23	Eckenfelder (1966) ^A
2	98.74	Eckenfelder (1966) ^B
3	98.72	O'Connor (1961) ^A and
4	91.21	Eckenfelder (1961) ^{AB}
5	99.21	Reynolds, T. D. (1982) ^A
6	98.49	Reynolds, T. D. (1982) ^B
7	98.85	Camp, T. R. (1946) ^A
8	87.99	San (1980)"
9	74.61	Zanoni, A. E. (1975) ^A
10	95.27	Berthouex (1982) ^A
11	99.99	Camp, T. R. (1946) ^B
12	100.00	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

3.3.1.6. Cálculo de eficiencia de P. Piro

Para determinar las eficiencias según el artículo de P. Piro, se tomaron las turbiedades finales en el sedimentador lamelar. La velocidad se calculó dividiendo la altura de la lamela entre el tiempo, una vez obtenida se multiplicó por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

El remanente de turbiedad (X_o), se determinó dividiendo la turbiedad final en el sedimentador entre la turbiedad inicial, que para este caso es 9.21 NTU.

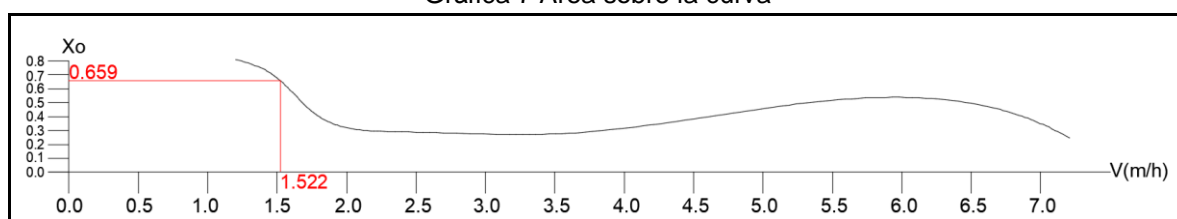
Tabla 50. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_2 , NTU 9.21.

To (min)	NTU _f	V (m/h)	Xo	(1 - Xo)
0	1.35			
10	2.32	7.2	0.25	0.75
20	2.55	3.6	0.28	0.72
30	2.7	2.4	0.29	0.71
40	3.7	1.8	0.40	0.60
50	6.6	1.44	0.72	0.28
60	7.5	1.2	0.81	0.19

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos anteriormente, se realizó grafica de V vs Xo, esto con el fin de determinar el área bajo la curva. El punto de corte se determino con la velocidad ascensional multiplicada por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

Gráfica 7 Área sobre la curva



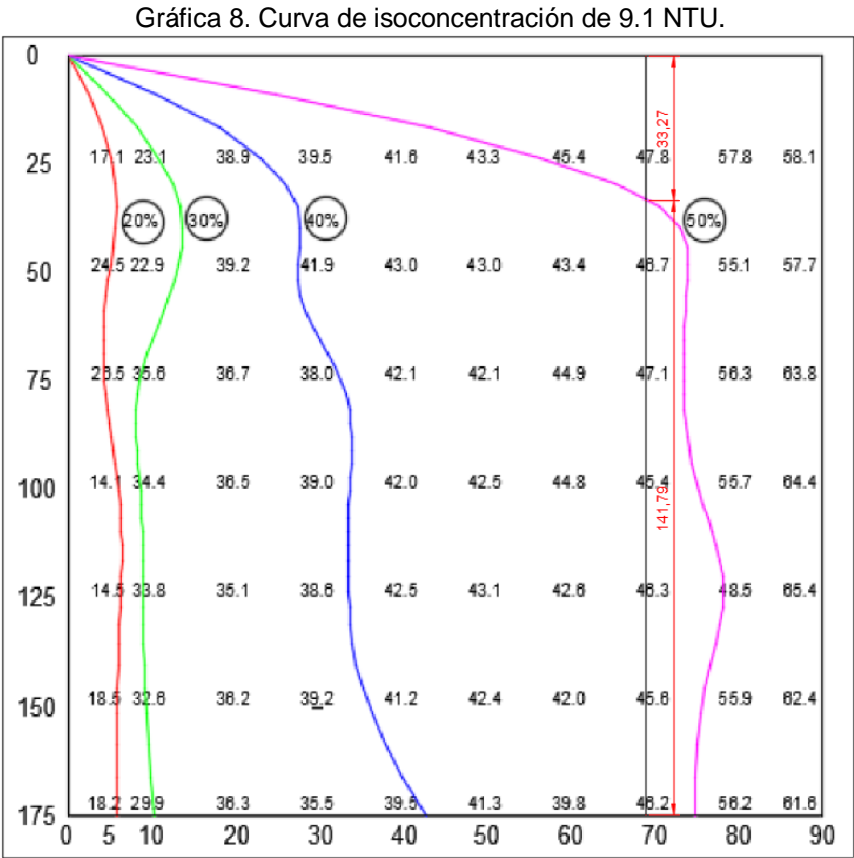
Fuente: Autores.

No fue posible calcular al área sobre la curva, puesto que el punto de corte en la gráfica al ser proyectado perpendicularmente hacia el eje y, se encuentra bajo la curva, por lo tanto, no se puede determinar la eficiencia de remoción para este caudal.

3.3.1.7. Cálculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación

Con la curva de isoconcentración de turbiedad de 9.1 NTU, correspondiente al trabajo de grado: *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”* se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia, utilizando la ecuación 16, el tiempo se obtiene a partir de la velocidad ascensional, por medio de la ecuación 17.

Este tiempo es utilizado como línea de corte en la gráfica, a continuación, se representa de manera gráfica el procedimiento realizado.



Fuente: Autores.

Con las dimensiones que se encuentran en la curva de isoconcentración, se realizó el cálculo de Porcentaje de Eficiencia, teniendo en cuenta la ecuación 16.

Tabla 51. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q₂, NTU 9.1.

Alturas en la gráfica:	h1=	33.27	cm
	h2=	141.73	cm
Porcentajes de remoción:	100		%
	50		%
	40		%
Eficiencia:	50.703		%

Fuente: Autores.

3.3.2. Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 11.6 NTU.

3.3.2.1. Cálculos Iniciales de la PTAP.

En la siguiente tabla, se presentan los resultados correspondientes a las velocidades ascensional y crítica de sedimentación en los cuales se utilizaron las ecuaciones 1 y 5 respectivamente; las longitudes, relativa, crítica y de placas se calcularon con las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente y para la carga superficial y el tiempo de concentración se utilizaron las ecuaciones 7 y 6 respectivamente.

Tabla 52 Cálculos iniciales de la PTAP

CALCULOS INICIALES DE LA PTAP		
Caudal (m^3/min):	0,0035	m^3/min
Velocidad inicial de sedimentación (V_0):	0,02538	m/min
Longitud de Placas (L):	20	m
Longitud relativa (L'):	0,304	m
Longitud Crítica (L_c):	19,70	m
Velocidad de sedimentación crítica (V_{sc}):	0,0015	m/min
Carga Superficial (C_s):	0,038	
Tiempo t (min):	47,283	min
Volumen (Vol):	0,1663	m^3
Longitud de Lamelas (h)	1,2	m
Viscosidad cinemática a 17°C	0.00006516	m^2/min

Fuente: Autores.

3.3.2.2. Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar.

De acuerdo a los datos de turbiedad tomados en la práctica de laboratorio, se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción para cada intervalo de tiempo para los caudales y turbiedades empleados.

Empleando la ecuación 10 se obtuvieron las siguientes eficiencias para el caudal 1 y NTU 11.6.

Tabla 53. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 11.6.

TURBIEDAD: 11.6 NTU		
	<i>Tiempo (min)</i>	% EFICIENCIA
1	00:00	77,19
2	10:00	35,86
3	20:00	43,75
4	30:00	44,24
6	40:00	32,39
7	50:00	39,12
8	60:00	34,46

Fuente: Autores.

3.3.2.3. Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa

Para determinar las eficiencias de eliminación según Evans M.N. Chirwa, éstas se calcularon con la ecuación 11.

Tabla 54. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 11.6.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS EXPERIMENTALES	
1	18.207
2	23.279
3	18.187
4	24.366
5	32.737

Fuente: Autores.

Evans M.N. Chirwa tomó datos de otros autores con el fin de determinar cuál de los parámetros (experimentales o literatura) presentan mejor eficiencia de remoción. Los datos de los otros autores se encuentran en la tabla 4. Se realizó el cálculo de las eficiencias de remoción con la Ecuación No. 10

Tabla 55. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 11.6.

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS DE LITERATURA	
54.217	Je et al
38.519	Reynolds y Richards
18.856	Berthouex & Stevens
56.678	Eckenfelder

Fuente: Autores.

3.3.2.4. Cálculo de eficiencia de Adem Özer

Para determinar el porcentaje de remoción según Adem Özer se calculó con la ecuación 12 y los parámetros a, b y d se obtuvieron de la tabla No. 6.

Tabla 56. Porcentaje de Remoción Q_2 , NTU 11.6.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	37.86	Weber (1972)
2	17.66	Berthouex (1982)
3	33.05	O'Connor (1961)
4	62.47	Zanoni (1975)
5	18.37	Campo (1946)
6	19.45	Huisman (1972)
7	35.05	Huisman (1972)
8	41.55	O'Connor (1961)
9	49.37	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

Además, este autor realiza una predicción de la eficiencia de eliminación, la cual se realizó con la ecuación 13, los parámetros de a, b y d, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 6.

Tabla 57. Predicción de la eficiencia de eliminación Q_2 , NTU 11.6.

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
1	69.49	Weber (1972)
2	85.87	Berthouex (1982)
3	71.14	O'Connor (1961)
4	45.63	Zanoni (1975)
5	88.04	Campo (1946)

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
6	87.44	Huisman (1972)
7	87.52	Huisman (1972)
8	70.99	o'Connor (1961)
9	66.18	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

3.3.2.5. Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San.

Para determinar el porcentaje de remoción según Hasan Ali San se calculó con la ecuación 14, y los parámetros a, b y k, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 2.

Tabla 58. Porcentaje de remoción Q₂, NTU 11.6.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	66.23	Eckenfelder (1966) ^A
2	98.74	Eckenfelder (1966) ^B
3	98.72	O'Connor (1961) ^A and
4	91.21	Eckenfelder (1961) ^{AB}
5	99.21	Reynolds, T. D. (1982) ^A
6	98.49	Reynolds, T. D. (1982) ^B
7	98.85	Camp, T. R. (1946) ^A
8	87.99	San (1980) ["]
9	74.61	Zanoni, A. E. (1975) ^A
10	95.27	Berthouex (1982) ^A
11	99.99	Camp, T. R. (1946) ^B
12	100.00	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

3.3.2.6. Cálculo de eficiencia de P. Piro

Para determinar las eficiencias según el artículo de P. Piro, se tomaron las turbiedades finales en el sedimentador lamelar. La velocidad se calculó dividiendo la altura de la lamela entre el tiempo, una vez obtenida se multiplicó por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

El remanente de turbiedad (X_o), se determinó dividiendo la turbiedad final en el sedimentador entre la turbiedad inicial, que para este caso es 11.6 NTU.

Tabla 59. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_2 , NTU 11.6.

To (min)	NTU _f	V (m/h)	Xo	(1 - Xo)
0	3.8			
10	3.2	7.2	0.28	0.72
20	3.34	3.6	0.29	0.71
30	3.8	2.4	0.33	0.67
40	5.6	1.8	0.48	0.52
50	6	1.44	0.52	0.48
60	6	1.2	0.52	0.48

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos anteriormente, se realizó grafica de V vs Xo, esto con el fin de determinar el área bajo la curva. El punto de corte se determino con la velocidad ascensional multiplicada por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

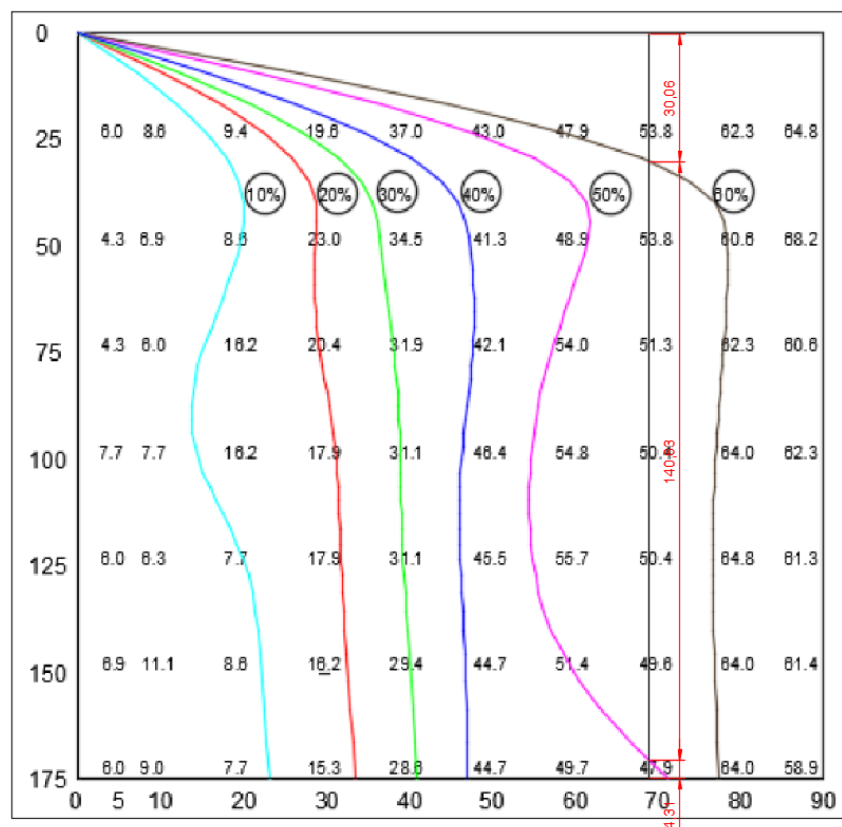
No fue posible calcular al área sobre la curva, puesto que el punto de corte en la gráfica al ser proyectado perpendicularmente hacia el eje y, se encuentra bajo la curva, por lo tanto, no se puede determinar la eficiencia de remoción para este caudal.

3.3.2.7. Calculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación

Con la curva de isoconcentración de turbiedad de 11.8 NTU, correspondiente al trabajo de grado: *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”* se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia, utilizando la ecuación 16, el tiempo se obtiene a partir de la velocidad ascensional, por medio de la ecuación 17.

Este tiempo es utilizado como línea de corte en la gráfica, a continuación, se representa de manera gráfica el procedimiento realizado.

Gráfica 9. Curva de isoconcentración de 11.8 NTU.



Fuente: Autores.

Con las dimensiones que se encuentran en la curva de isoconcentración, se realizó el cálculo de Porcentaje de Eficiencia, teniendo en cuenta la ecuación 16:

Tabla 60. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_2 , NTU 11.8.

Alturas en la gráfica:	h1=	30.06	cm
	h2=	140.63	cm
	h3=	4.31	cm
Porcentajes de remoción:	100		%
	60		%
	50		%
	40		%
Eficiencia:	59.048		%

Fuente: Autores.

3.3.3. Cálculos de Eficiencias de la Turbiedad: 15 NTU

3.3.3.1. Cálculos Iniciales de la PTAP

En la siguiente tabla, se presentan los resultados correspondientes a las velocidades ascensional y crítica de sedimentación en los cuales se utilizaron las ecuaciones 1 y 5 respectivamente; las longitudes, relativa, crítica y de placas se calcularon con las ecuaciones 2, 3 y 4 respectivamente y para la carga superficial y el tiempo de concentración se utilizaron las ecuaciones 7 y 6 respectivamente.

Tabla 61 Cálculos iniciales de la PTAP

CALCULOS INICIALES DE LA PTAP		
Caudal (m^3/min):	0,0035	m^3/min
Velocidad inicial de sedimentación (V_0):	0,0254	m/min
Longitud de Placas (L):	20	m
Longitud relativa (L'):	0,3061	m
Longitud Crítica (Lc):	19,69	m
Velocidad de sedimentación crítica (V_{sc}):	0,00145	m/min
Carga Superficial (Cs):	0,04	
Tiempo t (min):	47.283	min
Volumen (Vol):	0,1663	m^3
Longitud de Lamelas (h)	1,2	m
Viscosidad cinemática a 16,8°C	0,00006468	m^2/min

Fuente: Autores.

3.3.3.2. Cálculo de eficiencia de remoción de partículas en el Sedimentador Lamelar.

De acuerdo a los datos de turbiedad tomados en la práctica de laboratorio, se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia de remoción para cada intervalo de tiempo para los caudales y turbiedades empleados.

Empleando la ecuación 10 se obtuvieron las siguientes eficiencias para el caudal 1 y NTU 15

Tabla 62. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 15.

TURBIEDAD: 15 NTU		
<i>Tiempo (min)</i>		% EFICIENCIA
1	00:00	73.61
2	10:00	53.57
3	20:00	49.26
4	30:00	51.61
6	40:00	45.41
7	50:00	47.33
8	60:00	45.12

Fuente: Autores.

3.3.3.3. Cálculo de eficiencia de Evans M.N. Chirwa

Para determinar las eficiencias de eliminación según Evans M.N. Chirwa, éstas se calcularon con la ecuación 11.

Tabla 63. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 15,

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS EXPERIMENTALES	
1	18.207
2	23.279
3	18.187
4	24.366
5	32.737

Fuente: Autores.

Evans M.N. Chirwa tomó datos de otros autores con el fin de determinar cuál de los parámetros (experimentales o literatura) presentan mejor eficiencia de remoción. Los datos de los otros autores se encuentran en la tabla 4. Se realizó el cálculo de las eficiencias de remoción con la Ecuación No. 10

Tabla 64. Eficiencias de remoción Q_2 , NTU 15

EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DATOS DE LITERATURA	
54.217	Je et al
38.519	Reynolds y Richards
18.856	Berthouex & Stevens
56.678	Eckenfelder

Fuente: Autores.

3.3.3.4. Cálculo de eficiencia de Adem Özer

Para determinar el porcentaje de remoción según Adem Özer se calculó con la ecuación 12 y los parámetros a, b y d se obtuvieron de la tabla No. 6.

Tabla 65. Porcentaje de Remoción Q_2 , NTU 15.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	37.864	Weber (1972)
2	17.663	Berthouex (1982)
3	33.048	O'Connor (1961)
4	62.471	Zanoni (1975)
5	18.366	Campo (1946)
6	19.449	Huisman (1972)
7	35.047	Huisman (1972)
8	41.547	O'Connor (1961)
9	49.372	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

Además, este autor realiza una predicción de la eficiencia de eliminación, la cual se realiza con la ecuación 13 y los parámetros a, b y d se obtuvieron de la tabla No. 6.

Tabla 66. Predicción de la eficiencia de eliminación Q_2 , NTU 15.

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
1	69.489	Weber (1972)
2	85.870	Berthouex (1982)
3	71.137	o'Connor (1961)
4	45.630	Zanoni (1975)
5	88.043	Campo (1946)

PREDICCIÓN DE LA EFICIENCIA		
6	87.444	Huisman (1972)
7	87.519	Huisman (1972)
8	70.986	o'Connor (1961)
9	66.184	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

3.3.3.5. Cálculo de eficiencia de Hasan Ali San

Para determinar el porcentaje de remoción según Hasan Ali San se calculó con la ecuación 14 y los parámetros de a, b y k, se obtuvieron de acuerdo a la tabla No. 2

Tabla 67. Porcentaje de remoción Q₂, NTU 15.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN		
1	66.231	Eckenfelder (1966)A
2	98.742	Eckenfelder (1966)B
3	98.722	O'Connor (1961)A and
4	91.210	Eckenfelder (1961)AB
5	99.201	Reynolds, T. D. (1982)A
6	98.490	Reynolds, T. D. (1982)B
7	98.852	Camp, T. R. (1946)A
8	87.991	San (1980)"
9	74.607	Zanoni, A. E. (1975)A
10	95.268	Berthouex (1982)A
11	99.991	Camp, T. R. (1946)B
12	100.00	Huisman, L. (1972)B

Fuente: Autores.

3.3.3.6. Cálculo de eficiencia de P. Piro

Para determinar las eficiencias según el artículo de P. Piro, se tomaron las turbiedades finales en el sedimentador lamelar. La velocidad se calculó dividiendo la altura de la lamela entre el tiempo, una vez obtenida se multiplicó por 60 minutos con el fin de tener la velocidad en unidades metro/hora.

El remanente de turbiedad (X_o) se determinó, dividiendo la turbiedad final en el sedimentador entre y la turbiedad inicial, que para este caso es 15 NTU.

Tabla 68. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_2 , NTU 15.

To (min)	NTUf	V (m/h)	Xo	(1 - Xo)
0	3,88			
10	6,5	7,2	0,43	0,57
20	6,9	3,6	0,46	0,54
30	6,63	2,4	0,44	0,56
40	7,26	1,8	0,48	0,52
50	6,9	1,44	0,46	0,54
60	6,86	1,2	0,46	0,54

Fuente: Autores.

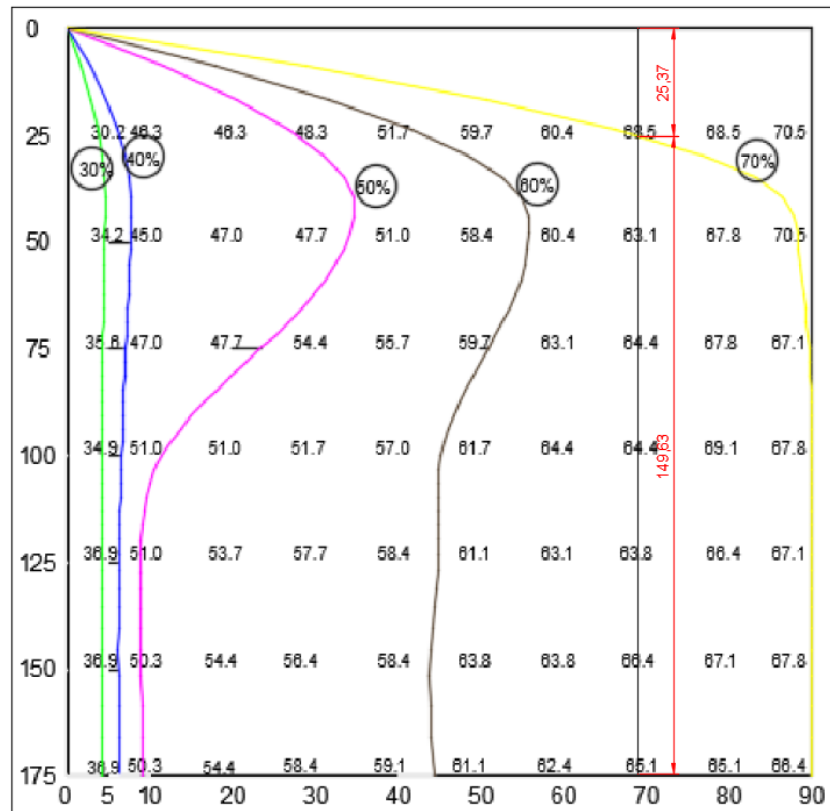
No fue posible calcular el área sobre la curva, puesto que el punto de corte en la gráfica al ser proyectado perpendicularmente hacia el eje y, se encuentra bajo la curva, por lo tanto, no se puede determinar la eficiencia de remoción para este caudal.

3.3.3.7. Cálculo de Eficiencias a partir de la Torre de Sedimentación

Con la curva de isoconcentración de turbiedad de 14.9NTU, correspondiente al trabajo de grado: *“Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de San’s para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas”* se realizó el cálculo del porcentaje de eficiencia, utilizando la ecuación 16:

El tiempo se obtiene a partir de la velocidad ascensional, por medio de la siguiente ecuación 17, es utilizado como línea de corte en la gráfica, a continuación, se representa de manera gráfica el procedimiento realizado.

Gráfica 10. Curva de isoconcentración de 14.9 NTU.



Fuente: Autores.

Con las dimensiones que se encuentran en la curva de isoconcentración, se realizó el cálculo de Porcentaje de Eficiencia, teniendo en cuenta la ecuación 16.

Tabla 69. Cálculos para determinar Eficiencia de remoción Q_2 , NTU 14.9.

Alturas en la gráfica:	h1=	25.37	cm
	h2=	149.63	cm
Porcentajes de remoción:	100		%
	70		%
	60		%
Eficiencia	67.899		%

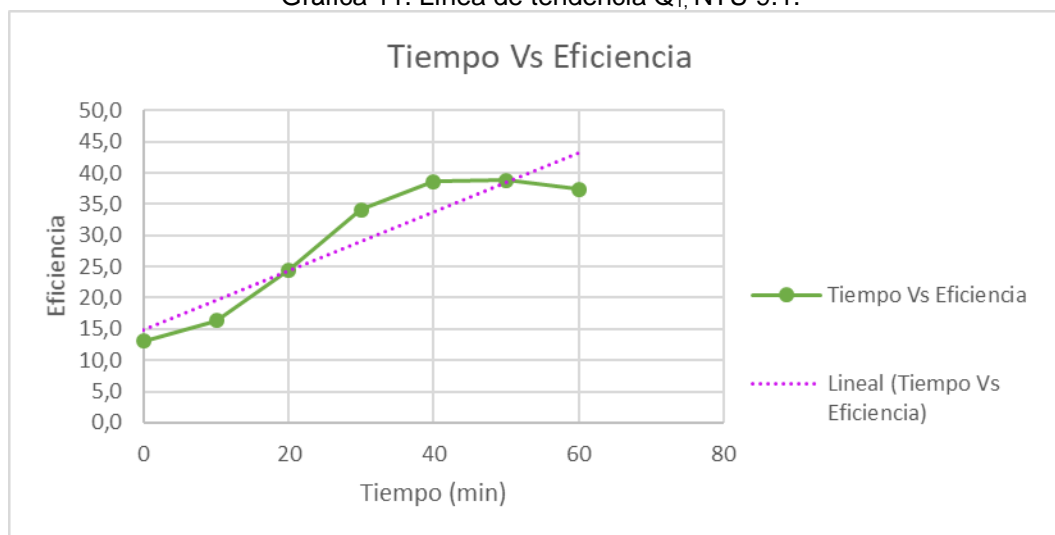
Fuente: Autores.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS: TURBIEDAD 9.1 NTU – CAUDAL 1.

4.1.1. Análisis de tendencia de resultados

Gráfica 11. Línea de tendencia Q_1 , NTU 9.1.



Fuente: Autores.

De acuerdo a la gráfica No. 12, se observa que en el sedimentador lamelar en el minuto 40 presenta su mayor porcentaje de remoción de partículas sólidas, a partir de este tiempo, se observa que el porcentaje de remoción tiende a mantenerse constante o poca variabilidad.

4.1.2. Análisis y comparación según Evans M.N. Chirwa

Tabla 70. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_1 , NTU 9.1.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia Datos Experimentales
6,02	48.68	33,40 (1)
	+	42,09 (2)
	34.66	33,92 (3)
	-	43,53 (4)
	28.64	62,18 (5)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 70, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, los experimentos 1, 2, 3 y 4 se encuentran dentro del rango del promedio de porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar, por lo tanto, la ecuación No. 11 pueden ser empleada en el diseño de sedimentador de alta tasa bajo los datos de experimentación 1, 2, 3 y 4 propuestos por el autor.

Tabla 71. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_1 , NTU 9.1.

EFICIENCIA EVAMS M.N. CHIRWA			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia Datos de la Literatura	Autores
6,02	48.68	74,01	Je et al
	+	55,27	Reynolds y Richards
	34.66	26,79	Berthouex & Stevens
	-	75,25	Eckenfelder
	28.64		

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 71, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, en la cual fueron aplicados los parámetros (r_1 , r_2 y r_3), propuestos por: Je et al, Reynolds y Richards, Berthouex & Stevens y Eckenfelder, ninguna de las eficiencias obtenidas se encuentra dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar.

4.1.3. Análisis y comparación según Adem Özer

Tabla 72. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₁, NTU 9.1.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
6,02	48.68 + 34.66 - 28.64	49,06	Weber (1972)
		25,28	Berthouex (1982)
		44,02	O'Connor (1961)
		80,53	Zanoni (1975)
		40,40	Campo (1946)
		39,25	Huisman (1972)
		88,78	Huisman (1972)
		51,12	O'Connor (1961)
		62,92	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 72, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, solo los experimentos de O'Connor (1961), Campo (1946) y Huisman (1972) se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar, por lo tanto, la ecuación No. 12 pueden ser empleada en el diseño de sedimentador de alta tasa bajo los datos de O'Connor (1961), Campo (1946) y Huisman (1972) propuestos por el autor.

Tabla 73. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₁, NTU 9.1.

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
6,02	48.68 + 34.66 - 28.64	60,47	Weber (1972)
		79,77	Berthouex (1982)
		61,55	O'Connor (1961)
		29,91	Zanoni (1975)
		73,70	Campo (1946)
		74,66	Huisman (1972)

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
		68,38	Huisman (1972)
		64,30	O'Connor (1961)
		56,90	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 73, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, solo el experimento de Zanoni (1975) se encuentra dentro del rango del promedio de predicción de eficiencia de remoción del sedimentador lamelar.

4.1.4. Análisis y comparación según Hasan Ali San

Tabla 74. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Hasan Ali San Q_1 , NTU 9.1.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN - HASAN ALI SAN			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
6,02	48.68 + 34.66 - 28.64	59,57	Eckenfelder (1966) ^A
		97,87	Eckenfelder (1966) ^B
		97,97	O'Connor (1961) ^A and
		84,91	Eckenfelder (1961) ^{AB}
		98,42	Reynolds, T. D. (1982) ^A
		97,36	Reynolds, T. D. (1982) ^B
		96,47	Camp, T. R. (1946) ^A
		77,67	San (1980)"
		59,69	Zanoni, A. E. (1975) ^A
		92,58	Berthouex (1982) ^A
		99,97	Camp, T. R. (1946) ^B
		100,00	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación empírica desarrollada por Hasan Ali San, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción.

4.1.5. Análisis y comparación según P. Piro

Tabla 75. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de P. Piro Q₁, NTU 9.1.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN P. PIRO Y OTROS		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
6,02	48.68	35,28
	+	
	34.66	
	-	
	28.64	

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por P.Piro, la eficiencia de remoción se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción, por lo tanto, esta ecuación empírica puede ser empleada para el diseño de un sedimentador lamelar.

4.1.6. Análisis y comparación entre eficiencia en el sedimentador lamelar y la torre de sedimentación.

Tabla 76. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Torre de Sedimentación Q₁, NTU 9.1.

TORRE DE SEDIMENTACIÓN Vs SEDIMENTADOR LAMELAR		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
6,02	48.68	46,89
	+	
	34.66	
	-	
	28.64	

Fuente: Autores.

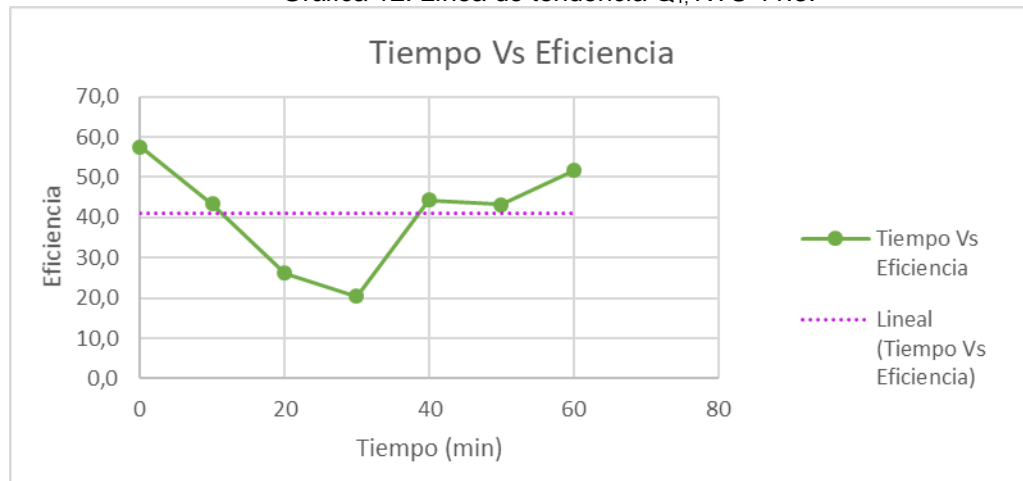
De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación de eficiencia de sedimentación discretas de partículas floculadas, se encuentra dentro

del rango del promedio de porcentaje de eficiencia de remoción. Por lo tanto, se puede tener en consideración los datos de eficiencia de remoción de una torre de sedimentación para el diseño de un sedimentador lamelar.

4.2. ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURBIEDAD 11.3 NTU – CAUDAL 1.

4.2.1. Análisis de tendencia de resultados

Gráfica 12. Línea de tendencia Q_1 , NTU 11.3.



Fuente: Autores.

De acuerdo a la gráfica anterior, se observa que en el sedimentador lamelar empieza en el minuto 0 a presentar una eficiencia de remoción cercano al 60% pero su eficiencia disminuye con respecto al tiempo para posteriormente estabilizarse a partir del minuto 40. La línea de tendencia indica que para la turbiedad 11.3 NTU y con el caudal de diseño de la PTAP presenta una eficiencia de remoción del 40%

4.2.2. Análisis y comparación según Evans M.N. Chirwa

Tabla 77. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q₁, NTU 11.3.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos Experimentales
6,41	54,43	33,121 (1)
	+	41,749 (2)
	48,02	33,629 (3)
	-	43,181 (4)
	41,61	61,645 (5)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, solo los experimentos 2 y 4 se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar, por lo tanto, la ecuación No. 11 pueden ser empleada en el diseño de sedimentador de alta tasa bajo los datos de experimentación 1 y 3 propuestos por el autor.

Tabla 78. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q₁, NTU 11.3.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos de la Literatura	Autores
6,41	54,43	73,694	Je et al
	+	55,010	Reynolds y Richards
	48,02	26,667	Berthouex & Stevens
	-	74,954	Eckenfelder
	41,61		

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, ningún valor se encuentra dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar de una turbiedad de 11.3 NTU para el caudal de diseño de la PTAP.

4.2.3. Análisis y comparación según Adem Özer

Tabla 79. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₁, NTU 11.3

PORCENTAJE DE REMOCIÓN ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
6,41	54,43 + 48,02 - 41,61	48,884	Weber (1972)
		25,161	Berthouex (1982)
		43,851	O'Connor (1961)
		80,248	Zanoni (1975)
		39,964	Campo (1946)
		38,875	Huisman (1972)
		87,654	Huisman (1972)
		50,979	O'Connor (1961)
		62,716	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, solo los experimentos de Weber (1972) y O'Connor (1961), se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar, por lo tanto, la ecuación No. 12 pueden ser empleada en el diseño de sedimentador de alta tasa bajo los datos de Weber (1972) y O'Connor (1961) propuestos por el autor.

Tabla 80. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₁, NTU 11.3

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
6,41	54,43 + 48,02 - 41,61	60,609	Weber (1972)
		79,872	Berthouex (1982)
		61,702	O'Connor (1961)
		30,158	Zanoni (1975)
		73,982	Campo (1946)
		74,903	Huisman (1972)
		68,784	Huisman (1972)

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
		64,400	O'Connor (1961)
		57,044	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción.

4.2.4. Análisis y comparación según Hasan Ali San

Tabla 81. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Hasan Ali San Q_1 , NTU 11.3.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN - HASAN ALI SAN			
Desviación Estandar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
6,41	54,43 + 48,02 - 41,61	59,660	Eckenfelder (1966) ^A
		97,888	Eckenfelder (1966) ^B
		97,979	O'Connor (1961) ^A and
		85,017	Eckenfelder (1961) ^{AB}
		98,432	Reynolds, T. D. (1982) ^A
		97,381	Reynolds, T. D. (1982) ^B
		96,524	Camp, T. R. (1946) ^A
		77,844	San (1980) ["]
		59,916	Zanoni, A. E. (1975) ^A
		92,626	Berthouex (1982) ^A
		99,971	Camp, T. R. (1946) ^B
		100,000	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación empírica desarrollada por Hasan Ali San, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción.

4.2.5. Análisis y comparación según P. Piro

Tabla 82. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de P. Piro Q₁, NTU 11.3.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN P. PIRO Y OTROS		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% eficiencia de Remoción
6,41	54,43 + 48,02 - 41,61	20,00

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por P.Piro, la eficiencia de remoción se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción, por lo tanto, esta ecuación empírica puede ser empleada para el diseño de un sedimentador lamelar.

4.2.6. Análisis y comparación entre eficiencia en el sedimentador lamelar y la torre de sedimentación.

Tabla 83. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Torre de Sedimentación Q₁, NTU 11.3.

TORRE DE SEDIMENTACIÓN Vs SEDIMENTADOR LAMELAR		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% eficiencia de Remoción
6,41	54,43 + 48,02 - 41,61	37,050

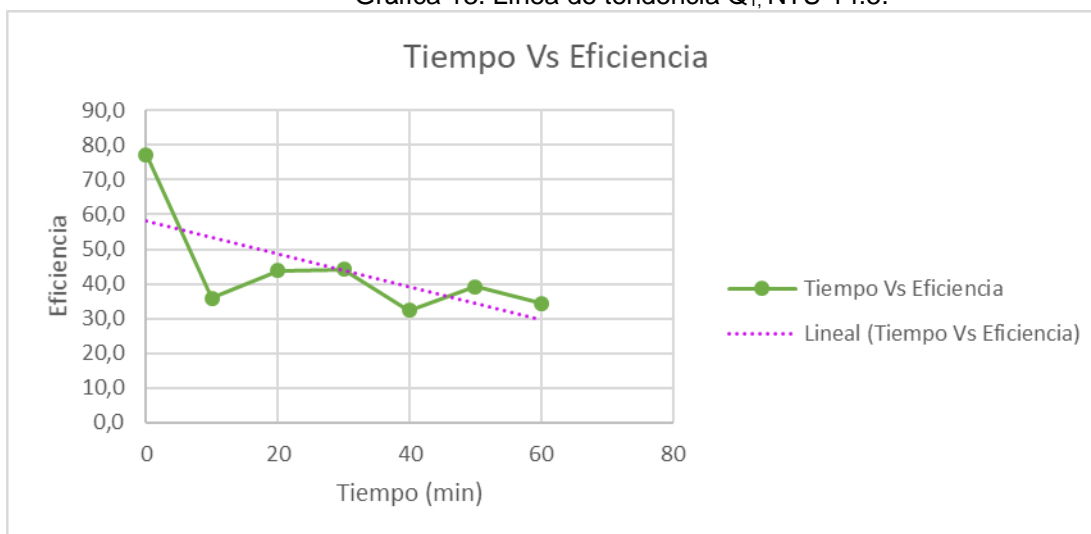
Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación de eficiencia de sedimentación discretas de partículas floculadas, no se encuentra dentro del rango del promedio de porcentaje de eficiencia de remoción.

4.3. ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURBIEDAD 14.5 NTU – CAUDAL 1.

4.3.1. Análisis de tendencia de resultados

Gráfica 13. Línea de tendencia Q_1 , NTU 14.5.



Fuente: Autores.

De acuerdo con la anterior gráfica, se observa que la sedimentación en este caudal y turbiedad, tiende a ir disminuyendo con el tiempo, su mayor porcentaje de remoción de partículas sólidas se observa en tiempo 0, por lo que se puede inferir que el sedimentador en este tiempo debido a la disminución de la velocidad ascensional está presentando la salida del First Flow o primer caudal, y en general, el sedimentador está cumpliendo su función de remover partículas discretas.

4.3.2. Análisis y comparación según Evans M.N. Chirwa

Tabla 84. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_1 , NTU 14.5.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	eficiencia - Datos Experimentales
4,92	43,22	33,121 (1)
	+	41,749 (2)
	38,30	33,629 (3)
	-	43,181 (4)
	33,38	61,645 (5)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, los experimentos 1, 2, 3 y 4 se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar, por lo tanto, la ecuación No. 11 pueden ser empleada en el diseño de sedimentador de alta tasa bajo los datos de experimentación 1, 2 ,3 y 4 propuestos por el autor.

Tabla 85. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_1 , NTU 14.5.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA			
Desviación Estándar	Promedio % de eficiencia	Eficiencia - Datos de la Literatura	Autores
4,92	43,22	73,694	Je et al
	+	55,010	Reynolds y Richards
	38,30	26,667	Berthouex & Stevens
	-	74,954	Eckenfelder
	33,38		

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, ningún valor se encuentra dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar de una turbiedad de 14.5 NTU para el caudal de diseño de la PTAP.

4.3.3. Análisis y comparación según Adem Özer

Tabla 86. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₁, NTU 14.5

PORCENTAJE DE REMOCIÓN ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
4,92	43,22 + 38,30 - 33,38	48,884	Weber (1972)
		25,161	Berthouex (1982)
		43,851	O'Connor (1961)
		80,248	Zanoni (1975)
		39,964	Campo (1946)
		38,875	Huisman (1972)
		87,654	Huisman (1972)
		50,979	O'Connor (1961)
		62,716	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, solo los experimentos de O'Connor (1961), Campo (1946) y Huisman (1972) se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar, por lo tanto, la ecuación No. 12 pueden ser empleada en el diseño de sedimentador de alta tasa bajo los datos de O'Connor (1961), Campo (1946) y Huisman (1972) propuestos por el autor.

Tabla 87. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₁, NTU 14.5

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de eficiencia de Remoción	Autores
4,92	43,22 + 38,30 - 33,38	60,609	Weber (1972)
		79,872	Berthouex (1982)
		61,702	O'Connor (1961)
		30,158	Zanoni (1975)
		73,982	Campo (1946)
		74,903	Huisman (1972)

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de eficiencia de Remoción	Autores
		68,784	Huisman (1972)
		64,400	O'Connor (1961)
		57,044	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción.

4.3.4. Análisis y comparación según Hasan Ali San

Tabla 88. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Hasan Ali San Q₁, NTU 14.5.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN - HASAN ALI SAN			
Desviación Estandar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
4,92	43,22 + 38,30 - 33,38	59,660	Eckenfelder (1966)A
		97,888	Eckenfelder (1966)B
		97,979	O'Connor (1961)A and
		85,017	Eckenfelder (1961)AB
		98,432	Reynolds, T. D. (1982)A
		97,381	Reynolds, T. D. (1982)B
		96,524	Camp, T. R. (1946)A
		77,844	San (1980)"
		59,916	Zanoni, A. E. (1975)A
		92,626	Berthouex (1982)A
		99,971	Camp, T. R. (1946)B
		99,999	Huisman, L. (1972)B

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación empírica desarrollada por Hasan Ali San, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción.

4.3.5. Análisis y comparación según P. Piro

Tabla 89. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de P. Piro Q₁, NTU 14.5.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN P. PIRO Y OTROS		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
4,92	43,22 + 38,30 - 33,38	0,00

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede observar que no existe ninguna aproximación entre las eficiencias del sedimentador lamelar y la ecuación desarrollada por P. Piro y otros, ya que por este medio no fue posible obtener ningún valor de porcentaje de eficiencia de remoción.

4.3.6. Análisis y comparación entre eficiencia en el sedimentador lamelar y la torre de sedimentación.

Tabla 90. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Torre de Sedimentación Q₁, NTU 14.5.

TORRE DE SEDIMENTACIÓN Vs SEDIMENTADOR LAMELAR		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
4,92	43,22 + 38,30 - 33,38	57,745

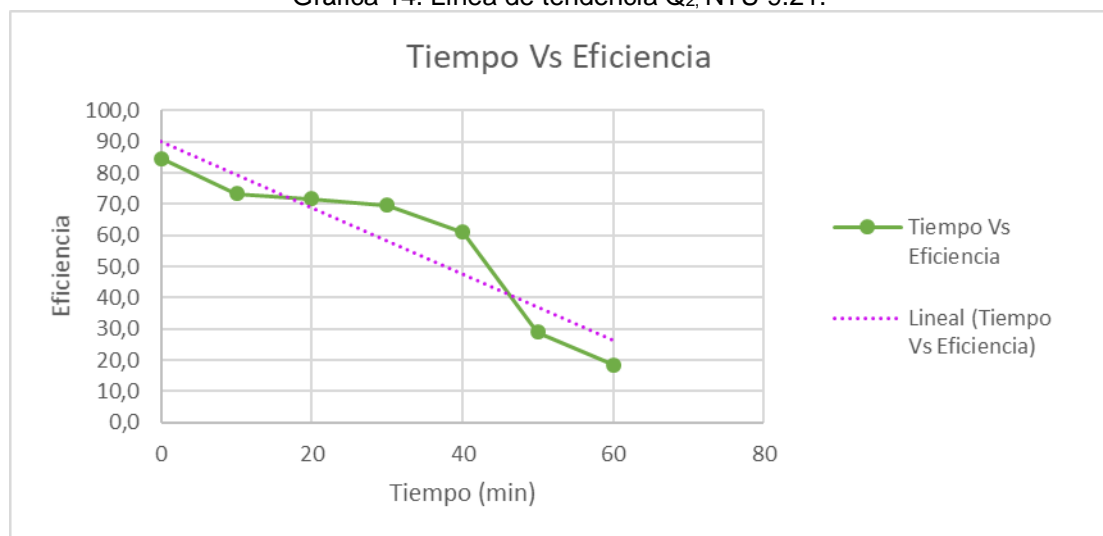
Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación de eficiencia de sedimentación discretas de partículas floculadas, no se encuentra dentro del rango del promedio de porcentaje de eficiencia de remoción.

4.4. ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURBIEDAD 9.21 NTU – CAUDAL 2.

4.4.1. Análisis de tendencia de resultados.

Gráfica 14. Línea de tendencia Q_2 , NTU 9.21.



Fuente: Autores.

De acuerdo con la anterior gráfica, se observa que la sedimentación en este caudal y turbiedad, tiende a ir disminuyendo con el tiempo, su mayor porcentaje de remoción de partículas sólidas se observa en tiempo 0, por lo que se puede inferir que el sedimentador en este tiempo debido a la disminución de la velocidad ascensional está presentando la salida del First Flow o primer caudal, y en general, el sedimentador no está cumpliendo su función de remover partículas discretas.

4.4.2. Análisis y comparación según Evans M.N. Chirwa

Tabla 91. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_2 , NTU 9.21.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos Experimentales
8.48	80.52	18.21 (1)
	+	23.28 (2)
	72.04	18.19 (3)
	-	24.37 (4)
	63.56	32.74 (5)

Fuente: Autores.

De acuerdo con la anterior tabla, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa y los datos experimentales propuestos por el autor, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia.

Tabla 92. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_2 , NTU 9.21.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos de la Literatura	Autores
8.48	80.52	54.22	Je et al
	+	38.52	Reynolds y Richards
	72.04	18.86	Berthouex & Stevens
	-	56.68	Eckenfelder
	63.56		

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 74, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, en la cual fueron aplicados los parámetros (r_1 , r_2 y r_3), propuestos por: Je et al, Reynolds y Richards, Berthouex & Stevens y Eckenfelder, ninguna de las eficiencias obtenidas se encuentra dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar.

4.4.3. Análisis y comparación según Adem Özer

Tabla 93. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₂, NTU 9.21.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
8.48	80.52 + 72.04 - 63.56	37.86	Weber (1972)
		17.66	Berthouex (1982)
		33.05	O'Connor (1961)
		62.47	Zanoni (1975)
		18.37	Campo (1946)
		19.45	Huisman (1972)
		35.05	Huisman (1972)
		41.55	O'Connor (1961)
		49.37	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 75, se puede determinar que por medio de la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, y teniendo como base los datos experimentales (a, b y d) propuestos por los autores Weber, Berthouex, O'Connor, Zanoni, Campo, Huisman y Eckenfelder, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia.

Tabla 94. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₂, NTU 9.21.

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
8.48	80.52 + 72.04 - 63.56	69.49	Weber (1972)
		85.87	Berthouex (1982)
		71.14	O'Connor (1961)
		45.63	Zanoni (1975)
		88.04	Campo (1946)
		87.44	Huisman (1972)
		87.52	Huisman (1972)

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
		70.99	O'Connor (1961)
		66.18	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 76, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer para determinar la predicción de la eficiencia de remoción, en la cual fueron aplicados los parámetros (r_1 , r_2 y r_3), propuestos por: Je et al, Reynolds y Richards, Berthouex & Stevens y Eckenfelder, las eficiencias que se encuentran dentro del rango del promedio de la eficiencia del sedimentador lamelar son las generadas por: Weber, O'Connor y Eckenfelder.

4.4.4. Análisis y comparación según Hasan Ali San

Tabla 95. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Hasan Ali San Q₂, NTU 9.21.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN - HASAN ALI SAN			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
8.48	80.52 + 72.04 - 63.56	66.23	Eckenfelder (1966) ^A
		98.74	Eckenfelder (1966) ^B
		98.72	O'Connor (1961) ^A and
		91.21	Eckenfelder (1961) ^{AB}
		99.21	Reynolds, T. D. (1982) ^A
		98.49	Reynolds, T. D. (1982) ^B
		98.85	Camp, T. R. (1946) ^A
		87.99	San (1980) ["]
		74.61	Zanoni, A. E. (1975) ^A
		95.27	Berthouex (1982) ^A
		99.99	Camp, T. R. (1946) ^B
		100.00	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 95, se puede determinar que, por medio de la ecuación desarrollada por Hasan Ali San para determinar la eficiencia de remoción, en la

cual fueron aplicados los parámetros (a, b y k), propuestos por: Eckenfelder, O'Connor, Reynolds T. D, Camp T. R., Sam, Zanoni, Berthouex y Huisman L., las eficiencias que se encuentran dentro del rango del promedio de la eficiencia del sedimentador lamelar son las generadas por: Eckenfelder y Zanoni.

4.4.5. Análisis y comparación según P. Piro y otros.

Tabla 96. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de P. Piro y Otros Q₂, NTU 9.21.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN P. PIRO Y OTROS		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
8.48	80.52 + 72.04 - 63.56	0.00

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 78, se puede observar que no existe ninguna aproximación entre las eficiencias del sedimentador lamelar y la ecuación desarrollada por P. Piro y otros, ya que por este medio no fue posible obtener ningún valor de porcentaje de eficiencia de remoción.

4.4.6. Análisis y comparación entre eficiencias del Sedimentador Lamelar y la Torre de Sedimentación Q₂, NTU 11.3.

Tabla 97. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con la Torre de Sedimentación Q₂, NTU 9.21.

TORRE DE SEDIMENTACIÓN Vs SEDIMENTADOR LAMELAR		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
8.48	80.52 + 72.04 - 63.56	50.70

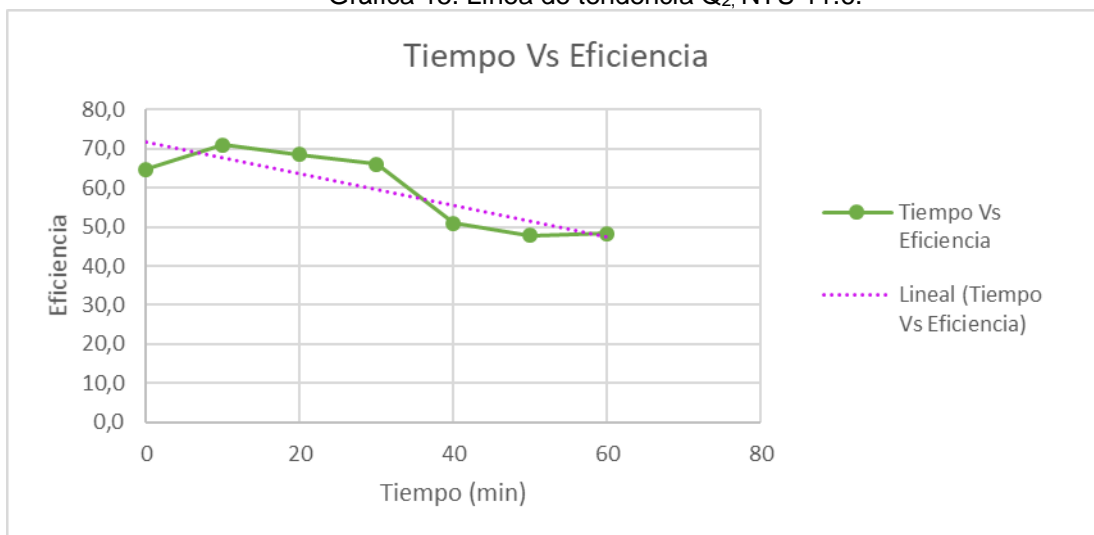
Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, por medio de la ecuación de eficiencia de sedimentación discreta de partículas floculadas, no se encuentra dentro del rango del promedio de porcentaje de eficiencia de remoción.

4.5. ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURBIEDAD 11.6 NTU – CAUDAL 2.

4.5.1. Análisis de tendencia de resultados.

Gráfica 15. Línea de tendencia Q_2 , NTU 11.6.



Fuente: Autores.

De acuerdo con la anterior gráfica, se observa que la tendencia de sedimentación en este caudal y turbiedad, tiende a ir disminuyendo con el tiempo, lo cual indica que el sedimentador lamelar no está cumpliendo su función de remover las partículas, o que la velocidad que presenta este caudal es tan baja que no logra arrastrar las partículas floculadas.

4.5.2. Análisis y comparación según Evans M.N. Chirwa

Tabla 98. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_2 , NTU 9.21.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos Experimentales
9.70	67,43	18.207

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos Experimentales
	+	23.279
	57,73	18.187
	-	24.366
	48,03	32.737

Fuente: Autores.

De acuerdo con la anterior tabla, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa y los datos experimentales propuestos por el autor, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia.

Tabla 99. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q₂, NTU 9.21.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos de la Literatura	Autores
9.70	67,43	54.217	Je et al
	+	38.519	Reynolds y Richards
	57,73	18.856	Berthouex & Stevens
	-	56.678	Eckenfelder
	48,03		

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 81, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, en la cual fueron aplicados los parámetros (r_1 , r_2 y r_3), propuestos por los autores relacionados en la tabla, se encuentra que las eficiencias que se encuentran dentro del rango del promedio de la eficiencia del sedimentador lamelar son las generadas por Je et al y Eckenfelder.

4.5.3. Análisis y comparación según Adem Özer

Tabla 100. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q₂, NTU 11.6.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Eficiencia de Remoción	Autores
9.70	67,43	37.864	Weber (1972)

PORCENTAJE DE REMOCIÓN ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Eficiencia de Remoción	Autores
	+ 57,73 - 48,03	17.663	Berthouex (1982)
		33.048	O'Connor (1961)
		62.471	Zanoni (1975)
		18.366	Campo (1946)
		19.449	Huisman (1972)
		35.047	Huisman (1972)
		41.547	O'Connor (1961)
		49.372	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 82, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer para determinar la predicción de la eficiencia de remoción, en la cual fueron aplicados los parámetros (r_1 , r_2 y r_3), propuestos por los autores relacionados en la tabla, las eficiencias que se encuentran dentro del rango del promedio de la eficiencia del sedimentador lamelar son las generadas por Zanoni y Eckenfelder.

4.5.4. Análisis y comparación según Hasan Ali San

Tabla 101. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Hasan Ali San Q₂, NTU 11.6.

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
9.70	67,43 + 57,73 - 48,03	69.489	Weber (1972)
		85.870	Berthouex (1982)
		71.137	O'Connor (1961)
		45.630	Zanoni (1975)
		88.043	Campo (1946)
		87.444	Huisman (1972)
		87.519	Huisman (1972)
		70.986	O'Connor (1961)
		66.184	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 83, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer para determinar la predicción de la eficiencia de remoción, en la cual fueron aplicados los parámetros (r_1 , r_2 y r_3), propuestos por los autores relacionados en la tabla, la eficiencia que se encuentran dentro del rango del promedio de la eficiencia del sedimentador lamelar es la generada por Eckenfelder.

4.5.5. Análisis y comparación según Hasan Ali San

Tabla 102. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Hasan Ali San Q₂, NTU 11.6.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN - HASAN ALI SAN			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
9.70	67,43 + 57,73 - 48,03	66.231	Eckenfelder (1966) ^A
		98.742	Eckenfelder (1966) ^B
		98.722	O'Connor (1961) ^A and
		91.210	Eckenfelder (1961) ^{AB}
		99.207	Reynolds, T. D. (1982) ^A
		98.490	Reynolds, T. D. (1982) ^B
		98.852	Camp, T. R. (1946) ^A
		87.991	San (1980) ["]
		74.607	Zanoni, A. E. (1975) ^A
		95.268	Berthouex (1982) ^A
		99.991	Camp, T. R. (1946) ^B
		100.000	Huisman, L. (1972) ^B

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 84, se puede determinar que, por medio de la ecuación desarrollada por Hasan Ali San para determinar la eficiencia de remoción, en la cual fueron aplicados los parámetros (a , b y k), propuestos por: propuestos por los autores relacionados en la tabla, la eficiencia que se encuentra dentro del rango del promedio de la eficiencia del sedimentador lamelar es la generada por Eckenfelder.

4.5.6. Análisis y comparación según P. Piro y otros.

Tabla 103. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de P. Piro y Otros Q_2 , NTU 11.6.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN P. PIRO Y OTROS		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
9.70	67,43 + 57,73 - 48,03	0.00

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla No. 85, se puede observar que no existe ninguna aproximación entre las eficiencias del sedimentador lamelar y la ecuación desarrollada por P. Piro y otros, ya que por este medio no fue posible obtener ningún valor de porcentaje de eficiencia de remoción.

4.5.7. Análisis y comparación entre eficiencias del Sedimentador Lamelar y la Torre de Sedimentación Q_2 , NTU 11.8.

Tabla 104. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con la Torre de Sedimentación Q_2 , NTU 11.8.

TORRE DE SEDIMENTACIÓN Vs SEDIMENTADOR LAMELAR		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
9.70	67,43 + 57,73 - 48,03	59.048

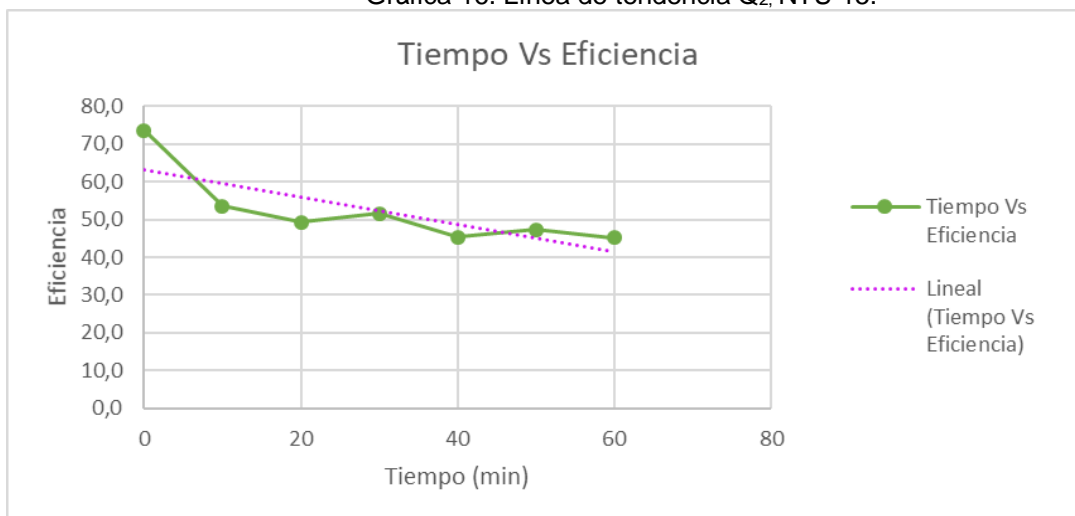
Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación de eficiencia de sedimentación discreta de partículas floculadas, se encuentra dentro del rango del promedio de porcentaje de eficiencia de remoción. Por lo tanto, se puede tener en consideración los datos de eficiencia de remoción de una torre de sedimentación para el diseño de un sedimentador lamelar.

4.6. ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS: TURBIEDAD 15 NTU – CAUDAL 2.

4.6.1. Análisis de tendencia de resultados

Gráfica 16. Línea de tendencia Q_2 , NTU 15.



Fuente: Autores.

De acuerdo con la anterior gráfica, se observa que la tendencia de sedimentación en este caudal y turbiedad, tiende a ir disminuyendo con el tiempo, lo cual indica que el sedimentador lamelar no está cumpliendo su función de remover las partículas, o que la velocidad que presenta este caudal es tan baja que no logra arrastrar las partículas floculadas.

4.6.2. Análisis y comparación según Evans M.N. Chirwa

Tabla 105. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_2 , NTU 15.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	eficiencia - Datos Experimentales
3,41	52,13	18,207 (1)
	+	23,279 (2)
	48,72	18,187 (3)
	-	24,366 (4)
	45,31	32,737 (5)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, ningún valor se encuentra dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar de una turbiedad de 15 NTU para el caudal de diseño de la PTAP.

Tabla 106. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Evans M.N. Chirwa Q_2 , NTU 15.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN EVAMS M.N. CHIRWA			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Eficiencia - Datos de la Literatura	Autores
3,41	52,13 + 48,72 - 45,31	54,217	Je et al
		38,519	Reynolds y Richards
		18,856	Berthouex & Stevens
		56,678	Eckenfelder

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Evans M.N. Chirwa, ningún valor se encuentra dentro del rango del promedio del porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar de una turbiedad de 15 NTU para el caudal de diseño de la PTAP.

4.6.3. Análisis y comparación según Adem Özer

Tabla 107. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q_2 , NTU 15

PORCENTAJE DE REMOCIÓN ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
3,41	52,13 + 48,72 - 45,31	37,864	Weber (1972)
		17,663	Berthouex (1982)
		33,048	O'Connor (1961)
		62,471	Zanoni (1975)
		18,366	Campo (1946)
		19,449	Huisman (1972)
		35,047	Huisman (1972)
		41,547	O'Connor (1961)
		49,372	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, solo el experimento de Eckenfelder (1966) se encuentra dentro del rango del promedio de porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar, por lo tanto, la ecuación No. 12 pueden ser empleada en el diseño de sedimentador de alta tasa bajo los datos de Eckenfelder (1966) propuestos por el autor.

Tabla 108. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Adem Özer Q_2 , NTU 15

PREDICCIÓN DE EFICIENCIA DE REMOCIÓN - ADEM ÖZER			
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	Predicción de Eficiencia de Remoción	Autores
3,41	52,13 + 48,72 - 45,31	69,489	Weber (1972)
		85,870	Berthouex (1982)
		71,137	O'Connor (1961)
		45,630	Zanoni (1975)
		88,043	Campo (1946)
		87,444	Huisman (1972)
		87,519	Huisman (1972)
		70,986	O'Connor (1961)
		100,000	Eckenfelder (1966)

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que bajo la ecuación empírica desarrollada por Adem Özer, no hay ningún valor de predicción de eficiencia que se encuentre dentro del rango del promedio de porcentaje de remoción de eficiencia del sedimentador lamelar.

4.6.4. Análisis y comparación según Hasan Ali San

Tabla 109. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de Hasan Ali San Q_2 , NTU 15.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN - HASAN ALI SAN			
Desviación Estandar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
3,41	52,13	66,231	Eckenfelder (1966)A

EFICIENCIA DE REMOCIÓN - HASAN ALI SAN			
Desviación Estandar	Promedio % de Eficiencia	Porcentaje de Remoción	Autores
	+ 48,72 - 45,31	98,742	Eckenfelder (1966)B
		98,722	O'Connor (1961)A and
		91,210	Eckenfelder (1961)AB
		99,207	Reynolds, T. D. (1982)A
		98,490	Reynolds, T. D. (1982)B
		98,852	Camp, T. R. (1946)A
		87,991	San (1980)"
		74,607	Zanoni, A. E. (1975)A
		95,268	Berthouex (1982)A
		99,991	Camp, T. R. (1946)B
		100,000	Huisman, L. (1972)B

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación empírica desarrollada por Hasan Ali San, las eficiencias de remoción no se encuentran dentro del rango del promedio del porcentaje de eficiencia de remoción.

4.6.5. Análisis y comparación según P. Piro

Tabla 110. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Ecuaciones Empíricas de P. Piro Q_2 , NTU 15.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN P. PIRO Y OTROS		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
3,41	52,13 + 48,72 - 45,31	0,00

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede observar que no existe ninguna aproximación entre las eficiencias del sedimentador lamelar y la ecuación

desarrollada por P. Piro y otros, ya que por este medio no fue posible obtener ningún valor de porcentaje de eficiencia de remoción.

4.6.6. Análisis y comparación entre eficiencia en el sedimentador lamelar y la torre de sedimentación.

Tabla 111. Comparación de Eficiencias del Sedimentador Lamelar con Torre de Sedimentación Q₂, NTU 15.

TORRE DE SEDIMENTACIÓN Vs SEDIMENTADOR LAMELAR		
Desviación Estándar	Promedio % de Eficiencia	% Eficiencia de Remoción
3,41	52,13 + 48,72 - 45,31	67,899

Fuente: Autores.

De acuerdo a la tabla anterior, se puede determinar que, bajo la ecuación de eficiencia de sedimentación discretas de partículas floculadas, no se encuentra dentro del rango del promedio de porcentaje de eficiencia de remoción.

5. CONCLUSIONES

En el desarrollo del presente trabajo se pudo establecer, que si se aumenta el caudal de diseño de la planta, los cálculos correspondientes a las velocidades ascensional y crítica, tiempo de retención difieren en gran medida presentándose ineficiencia en la remoción de partículas sólidas, lo que ocasionaría una pronta colmatación del filtro de la PTAP; por otra parte, si el caudal se disminuye con respecto al caudal de diseño, las velocidades disminuyen y el tiempo de retención aumenta, lo que implica que las partículas floculentas puedan quedarse en el floculador o a la entrada del sedimentador y por esta razón presenta una alta eficiencia de remoción.

De acuerdo a la literatura encontrada sobre la eficiencia de remoción de partículas sólidas, propuestas por: *Evans MN Chirwa et al, Hasan Ali San, P Piro et al, Adem Özer* y los cálculos y el análisis realizados en este proyecto, se pudo determinar que los autores de las ecuaciones empíricas que presentan mayor predicción en el comportamiento de remoción de partículas en condiciones de flujo continuo son:

- Evans MN Chirwa, con los datos experimentales 1, 2 y 4
- Adem Özer, con la ecuación de eficiencia y tomando los parámetros establecidos por O'Connor y Eckenfelder
- Adem Özer, con la ecuación de predicción y tomando los parámetros establecidos por Zanoni y Eckenfelder

Por otro lado, también se determinó la ecuación empírica de P. Piro es la que presenta menor predicción en cuanto a la eficiencia de remoción de partículas sólidas en el sedimentador lamelar.

Las eficiencias de remoción obtenidas a partir de las gráficas de isoconcentración del trabajo de grado "*Influencia de la Variación de la Turbiedad en los Coeficientes del Modelo de SAM para el Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Floculentas*" permiten hacer una predicción que nos es lo suficientemente cercana a la eficiencia que presenta el sedimentador lamelar de la planta piloto de la Universidad Católica de Colombia.

Para determinar el promedio de eficiencia de remoción adecuada en el sedimentador, es conveniente tener en cuenta las eficiencias que son cercanas entre si y descartar aquellos valores que se encuentren alejados de la media

aritmética, este se le conoce como first flow o primer caudal el cual es el encargado del lavado de la planta.

6. RECOMENDACIONES

De acuerdo con los datos obtenidos de eficiencia de remoción, según la ecuación empírica de Evans M.N. Chirwa, no es recomendable su utilización con combinaciones de parámetros (r_1 , r_2 y r_3) tomados de la literatura para el diseño de un sedimentador de alta tasa, ya que la predicción difiere en gran medida de los datos obtenidos del sedimentador lamelar.

De acuerdo con los datos obtenidos de eficiencia de remoción, según la ecuación empírica de Hasan Ali San, no es recomendable la utilización de ésta, para el diseño de un sedimentador de flujo continuo cuando se tenga un agua con turbiedad de 9.1 NTU puesto que ninguno de los parámetros desarrollados se acerca a la eficiencia promedio de remoción que presenta el sedimentador de alta tasa.

Se recomienda no cambiar el caudal de diseño de la planta piloto debido a que, si bien la planta es hidráulica, con cualquier variación en las condiciones se ve afectada el funcionamiento para el cual fue diseñada, dentro de estos podemos encontrar variación en las condiciones de sedimentación, sedimentación de las partículas en el floculador.

7. BIBLOGRAFÍA

- ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS. El agua potable segura es esencial. {En línea} {28 de octubre de 2016} disponible en: www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Coagulation-Flocculation-technologies.html.
- ADEM ÔZER, Simple equations to express settling column data.
- ARBOLEDA VALENCIA, Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 3 ed. Bogotá D.C. Mc Graw Hill. 2000. Pág. 238-242.
- BELTRAN, Luis. "Turbiedad, floculación y sedimentación de aguas" {En línea} {12 de diciembre 2018} disponible en: <http://procesosdeclarificaciodelagua.blogspot.com>.
- FAIR, Gordon Maskew., GEYES, Jhon y OKUN, Daniel Alexander. Abastecimiento de Agua y remoción de aguas residuales, Ingeniería sanitaria y de aguas residenciales, Volumen I. México Editorial Limusa. 1994.
- GARCIA, Espigares y FERNANDEZ, Freuget. Calidad del agua para consumo público: caracteres físico-químicos. En estudio sanitario del agua. Granada. Universidad de Granada, 1999, págs. 85 - 114.
- GUILLES, Ronald V., EVETT, Jack B. y LIU, Cheng. Mecánica de los fluidos e Hidráulica. 3 ed. Madrid. McGraw, 1994.
- HASAN, Ali San. Analytical approach for evaluation of settling column data.
- MANRIQUE PRIETO, Irne Alejandro Y GOMEZ CHAVES, Jhon Marcos. Diseño y construcción de una torre de sedimentación para la evaluación de los procesos de remoción y eficiencia en el tratamiento de agua potable. Bogotá D.C. 2016. 55p. Trabajo de investigación (Ingeniería Civil). Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería.
- MALDONADO YACTAYO, Víctor. Sedimentación. Capítulo 7. 2002.

- MONSALVE SÁENZ, Germán. Hidrología en la Ingeniería. E ed. Bogotá D.C. Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995. Pág. 102-110.
- MORENO, Ruthbel Yesid., OVALLE, Celis y ALONSO Cristian. Cartilla guía para la ejecución de prácticas de laboratorio en saneamiento de agua potable. Bogotá D.C. Universidad Catholic de Colombia. 2014. Pág. 230-236.
- NOMCEBO P SITHEBE, BHEKIZIZWE G METHULA AND EVANS MN CHIRWA, A finite velocity simulation of sedimentation behaviour of flocculating particles – A real-time model evaluation. South África.
- ORDUZ PAUNA, Oscar Iván Y PORTILLA NARVÁEZ, Jessica Cristina. Determinación de las curvas características de la sedimentación tipo II con diferentes coagulantes comerciales a nivel laboratorio. Bogotá D.C. 2017. 72p. Trabajo de investigación (Ingeniería Civil). Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería.
- P. PIRO, M. CARBONE, N. PENNA, J. MARSALEK, Characterization of the settling.
- PEREZ PARRA, Jorge Arturo. Manual de Potabilización de Aguas. Bogotá D.C Universidad Nacional de Colombia. 1997.
- PEREZ PARRA, Jorge Arturo Tratamiento de Aguas. Bogotá D.C. Universidad Nacional de Colombia. 1992.
- RESTREPO OSORNO, Hernán Alonso. Evaluación del proceso de coagulación – floculación de una planta de tratamiento de agua potable. Medellín. 2009.
- ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Purificación del Agua. 2 ed. Bogotá D.C. Escuela Colombia de Ingeniería. 2002. Pág. 49-53, 80-87, 124-149.
- SÁNCHEZ SANCHEZ, Andrés Ricardo Y SOTELO PINEDA, Diego Alexander. Influencia de la variación de la turbiedad en los coeficientes de modelo de san's para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas floculentas. Bogotá D.C. 2018. 47p. Trabajo de investigación (Ingeniería Civil). Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería.

ANEXOS

Formato de solicitud y programación de tiempo de laboratorio dedicado a práctica no asistida (libre)

PLAN DE TRABAJAJO PROYECTO DE GRADO
COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO CONVENCIONAL Y LAS ECUACIONES
EMPÍRICAS PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE
PARTÍCULAS FLOCULENTAS CON LOS RESULTADOS DE UN
SEDIMENTADOR LAMELAR

Para el desarrollo del análisis comparativo entre el método convencional y las ecuaciones empíricas se requiere realizar seis (6) sesiones de dos horas cada, en la cual se pretende tomar datos de turbiedades a la entrada de la planta de tratamiento y a la salida del sedimentador.

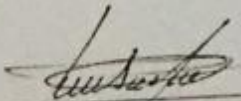
Las actividades correspondientes para cada uno de estos laboratorios son las siguientes:

1. Toma de parámetros característicos del agua disponible en el tanque.
2. Definir la dosificación del coagulante.
3. Toma de datos de turbiedad inicial antes de ser tratada.
4. Llenado de la planta.
5. Toma de datos de turbiedad a la entrada del floculador y a la salida del sedimentador lamelar, el cual se debe tomar con intervalos de 0 min, 5min, 15 min, 30 min, 45 min y 60 min.

PLAN DE TRABAJO		
Fecha	Caudal	Turbiedad: 9.1
02-09-2019	1	2 hrs
03-09-2019	2	2 hrs
		Turbiedad: 11.8
05-09-2019	1	2 hrs
06-09-2019	2	2 hrs
		Turbiedad: 14.9
09-09-2019	1	2 hrs
10-09-2019	2	2 hrs

Agradezco la atención prestada.

Cordialmente,


Felipe Santamaría A
Tutor

LOLARTE
Lorena Olarte-507116
Solicitante 1

Jeimy Manchola
Jeimy Manchola-506370
Solicitante 2

29 AGO 2019
Elizabeth Yule
7:14 pm



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIOS

FORMATO DE SOLICITUD Y PROGRAMACIÓN DE TIEMPO DE LABORATORIO DEDICADO A PRÁCTICA NO ASISTIDA (LIBRE)

F 053 LI 103 02

NOMBRE DE LA ASIGNATURA/PROYECTO DE INVESTIGACIÓN/SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN/TRABAJO DE GRADO QUE SUSTENTA LA SOLICITUD DE TIEMPO DE LABORATORIO: Trabajo de Grado
Comparación entre el método convencional y las ecuaciones empíricas para el
cálculo del porcentaje de Remoción de Partículas Acuosas.

IDENTIFICACIÓN DE LOS SOLICITANTES DE TIEMPO DE LABORATORIO:

CÓDIGO	NOMBRES Y APELLIDOS	E-MAIL @ucatolica.edu.co	TELÉFONO
507716	Lorena Clarte Benavides	lclarte16@ucatolica.edu.co	3124394467
506370	Jenny Mariela Manchada Acosta	jmanchada70@ucatolica.edu.co	321 2379414

PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDAD(ES) POR TIEMPO DE LABORATORIO SOLICITADO:

ID	HORARIO IDEAL			HORARIO OPCIONAL			ESPACIO SOLICITADO ⁽²⁾ (A-B-C-D-E)	ENSAYO(S) A REALIZAR EN CADA LAPSO
	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)		
1	2-09-19	16:00	18:00	2-09-19	18:00	20:00	D	Turbiedad
2	3-09-19	16:00	18:00	3-09-19	18:00	20:00	D	Turbiedad
3	5-09-19	16:00	18:00	5-09-19	18:00	20:00	D	Turbiedad
4	6-09-19	16:00	18:00	6-09-19	18:00	20:00	D	Turbiedad
5	9-09-19	16:00	18:00	9-09-19	18:00	20:00	D	Turbiedad

(1) Cada lapso solicitado será máximo de 2 HORAS por día. Por favor, asistir con puntualidad para mayor optimización del tiempo.

(2) A) Mecánica de suelos. B) Concretos. C) Mecánica de Sólidos. D) Análisis de agua. E) Hidráulica

MATERIALES /EQUIPOS/ INSUMOS A USAR	UND	CANT	A CARGO:	
			LAB	USU
Planta PTAP	UND	1		X
Agua	m ³	1	X	
Termómetro	3	3		X
Turbidímetro	UND	1		X
Montaje Alcalinidad	UND	1	X	

OBSERVACIONES

Entiendo que debo diligenciar completamente esta solicitud y que su aprobación me obliga a cumplir a cabalidad con el "Reglamento de los laboratorios" de la FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA y a acatar las órdenes que se impartan por parte del personal docente y administrativo. Los elementos de protección personal serán de mi propiedad. También me comprometo con el uso eficiente del horario asignado: asistir, informar la no asistencia (por lo menos con un día hábil de anticipación).

FIRMAS

LCLARTE

SOLICITANTE 1

Jenny Mariela Acosta

SOLICITANTE 2

SOLICITANTE 3

SOLICITANTE 4

SOLICITANTE 5

Ing. Felipe Santamaría

Recuerde enviar la imagen del formato totalmente diligenciado a labxco@ucatolica.edu.co



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

FACULTAD DE INGENIERÍA
LABORATORIOS

FORMATO DE SOLICITUD Y PROGRAMACIÓN DE TIEMPO DE
LABORATORIO DEDICADO A PRÁCTICA NO ASISTIDA (LIBRE)

F 053 LI 103 02

NOMBRE DE LA ASIGNATURA/PROYECTO DE INVESTIGACIÓN/SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN/TRABAJO DE GRADO QUE SUSTENTA LA
SOLICITUD DE TIEMPO DE LABORATORIO: TRABAJO DE GRADO
Comparación Entre El Método Convencional y las Ecuaciones Empíricas Para el
Cálculo del Porcentaje de Remoción de Partículas Flocculentas.

IDENTIFICACIÓN DE LOS SOLICITANTES DE TIEMPO DE LABORATORIO:

CÓDIGO	NOMBRES Y APELLIDOS	E-MAIL @ucatolica.edu.co	TELÉFONO
507116	Lorena Olarte Benavides	lolarte16@ucatolica.edu.co	3124394461
506370	Jerry Mariela Manchola Acosta	jmanchola2706@ucatolica.edu.co	3212379474

PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDAD(ES) POR TIEMPO DE LABORATORIO SOLICITADO:

ID	HORARIO IDEAL			HORARIO OPCIONAL			ESPACIO SOLICITADO ⁽²⁾ (A-B-C-D-E)	ENSAYO(S) A REALIZAR EN CADA LAPSO
	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)		
1	10-09-19	16:00	18:00	10-09-19	18:00	20:00	D	Turbiedad
2								
3								
4								
5								

(1) Cada lapso solicitado será máximo de 2 HORAS por día. Por favor, asistir con puntualidad para mayor optimización del tiempo.

(2) A) Mecánica de suelos. B) Concretos. C) Mecánica de Sólidos. D) Análisis de agua. E) Hidráulica

MATERIALES /EQUIPOS/ INSUMOS A USAR	UND	CANT	A CARGO:	
			LAB	USU
Planta PTAP	OND	1		X
Agua	m ³	1	X	
termómetro	OND	3		X
Turbidímetro	OND	1		X
montaje Alcalinidad	OND	1	X	

OBSERVACIONES

Entiendo que debo diligenciar completamente esta solicitud y que su aprobación me obliga a cumplir a cabalidad con el "Reglamento de los laboratorios" de la FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA y a acatar las órdenes que se impartan por parte del personal docente y administrativo. Los elementos de protección personal serán de mi propiedad. También me comprometo con el uso eficiente del horario asignado: asistir, informar la no asistencia (por lo menos con un día hábil de anticipación).

FIRMAS

LOLARTE.

SOLICITANTE 1

Jerry Mariela Acosta

SOLICITANTE 2

SOLICITANTE 3

SOLICITANTE 4

SOLICITANTE 5

ING. Felipe Santamaría

COORDINADOR DE LABORATORIOS

Recuerde enviar la imagen del formato totalmente diligenciado a labscivil@ucatolica.edu.co

NOMBRE DE LA ASIGNATURA/PROYECTO DE INVESTIGACIÓN/SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN/TRABAJO DE GRADO QUE SUSTENTA LA SOLICITUD DE TIEMPO DE LABORATORIO: **TRABAJO DE GRADO.**

Comparación entre el método convencional y las ecuaciones empíricas para el cálculo del porcentaje de remoción de partículas flocculantes con los resultados de un sedimento.

IDENTIFICACIÓN DE LOS SOLICITANTES DE TIEMPO DE LABORATORIO:

CÓDIGO	NOMBRES Y APELLIDOS	E-MAIL @ucatolica.edu.co	TELÉFONO
506370	Jaimy Mariela Manchola A.	jmanchola70@uca.	3212379414
507116	Lorena Olarte Benavides	lolarte16@ucatoli	3124394461

PROGRAMACIÓN DE ACTIVIDAD(ES) POR TIEMPO DE LABORATORIO SOLICITADO:

ID	HORARIO IDEAL			HORARIO OPCIONAL			ESPACIO SOLICITADO ⁽²⁾ (A-B-C-D-E)	ENSAYO(S) A REALIZAR EN CADA LAPSO
	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)	FECHA (dd/mm/AA)	HORA INICIO ⁽¹⁾ (HH:MM)	HORA FIN ⁽¹⁾ (HH:MM)		
1	12/09/19	16:00	18:00	12/09/19	14:00	16:00	D	Turbiedad
2	13/09/19	16:00	18:00	13/09/19	14:00	16:00	D	Turbiedad
3								
4								
5								

(1) Cada lapso solicitado será máximo de 2 HORAS por día. Por favor, asistir con puntualidad para mayor optimización del tiempo.

(2) A) Mecánica de suelos. B) Concretos. C) Mecánica de Sólidos. D) Análisis de agua. E) Hidráulica

MATERIALES/EQUIPOS/ INSUMOS A USAR	UND	CANT	A CARGO:	
			LAB	USU
Planta PTAP	und	1		X
Agua	m ³	1	X	
Termómetro	und	3		X
Turbidímetro	und	1		X
Montaje Alcalinidad	und	1	X	

OBSERVACIONES

Entiendo que debo diligenciar completamente esta solicitud y que su aprobación me obliga a cumplir a cabalidad con el "Reglamento de los laboratorios" de la FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA y a acatar las órdenes que se impartan por parte del personal docente y administrativo. Los elementos de protección personal serán de mi propiedad. También me comprometo con el uso eficiente del horario asignado: asistir, informar la no asistencia (por lo menos con un día hábil de anticipación).

FIRMAS

LOLARTE

SOLICITANTE 1

Jaimy Manchola Acosta

SOLICITANTE 2

SOLICITANTE 3

SOLICITANTE 4

SOLICITANTE 5

ING FELIPE SANTAMARÍA A.

COORDINADOR DE LABORATORIOS

Recuerde enviar la imagen del formato totalmente diligenciado a labscivil@ucatolica.edu.co